
Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation

Forschungsbericht

Michael Viehof, Hermann Winner
Darmstadt, 28.07.2017



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



FAHRZEUGTECHNIK
TU DARMSTADT

Stand der Technik und der Wissenschaft:
Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation

Autor: Michael Viehof, M.Sc.
Review: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Dieser Bericht umfasst 85 Seiten.

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Fahrzeugtechnik
Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Zusammenfassung

Die Validierung eines Simulationsmodells hat zum Ziel, eine Aussage über die Gültigkeit eines Modells für seinen Anwendungszweck zu treffen. Sie ist erforderlich, um Vertrauen in die durch die Simulation erzeugten Ergebnisse zu erzielen und damit die Simulation als alternatives Untersuchungswerkzeug zum Realversuch zu rechtfertigen. Damit hat der Validierungsprozess sowohl für simulationsbasierte Forschungsarbeiten als auch in der industriellen Anwendung eine große Bedeutung.

Insbesondere in der Automobilindustrie steigt die Erfordernis des Einsatzes von Simulationen bedingt durch die zunehmende Variantenvielfalt und Systemkomplexität, durch die stetig kürzer werdenden Entwicklungszyklen aber gleichzeitig steigende Anzahl von Testfällen und durch den wirtschaftlichen Marktdruck. Um auf (Vergleichs-) Versuche mit realen Fahrzeugen verzichten oder deren Anzahl reduzieren zu können, ist der Gültigkeitsnachweis der repräsentierenden Modelle, die als virtuelles Äquivalent zum Versuchsfahrzeug herangezogen werden, zwingend erforderlich.

Dieser Bericht über den Stand der Technik und der Wissenschaft gibt eine anwendungsdomänenunabhängige Übersicht über die bisherigen Forschungserkenntnisse in dem Bereich der Validierung. Dabei liegt der Fokus auf der operativen Modellvalidierung, die – basierend auf einem Vergleich von Messdaten des realen Systems mit Ausgangsdaten des Simulationsmodells – eine Aussage über die Übereinstimmungsgenauigkeit von Modell und realem System trifft. Eine Validierungsmethode setzt sich aus einem Validierungsprozess und den innerhalb des Prozesses angewendeten Validierungstechniken, mit deren Hilfe die Aussage über die Modellqualität getroffen wird, zusammen. Aus der Übersicht geht hervor, dass sich für die Modellvalidierung bis heute keine allgemeingültige Strategie durchgesetzt hat. Die Prozessdefinitionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer adressierten Schwerpunkte, wie beispielsweise Praktikabilität, Prozessstruktur, Modellanwendungen und Vertrauensnachweis. Im zeitlichen Verlauf der Veröffentlichungen sind eine zunehmende Systematisierung des Prozesses und das Bestreben nach objektiven Entscheidungen festzustellen. Der Überblick über die bestehenden Validierungstechniken zeigt, dass eine sehr große Vielzahl von Techniken besteht, die prinzipiell objektive Entscheidungen über die Qualität eines Modells zulassen. Bisher liegt jedoch keine Veröffentlichung vor, in der eine gezielte Verknüpfung eines durchgängig systematischen Validierungsprozesses mit objektivierbaren Validierungstechniken erfolgt.

Zudem bietet dieser Bericht eine Übersicht über bestehende Validierungsstudien im Anwendungsbeereich der Fahrdynamik. Anhand dieser Publikationen werden die aus den allgemeingültigen Veröffentlichungen abgeleiteten Erkenntnisse bestätigt. Die Modellvalidierung wird vollkommen unterschiedlich gestaltet, die Auswahl der Validitätskriterien sowie die Validierungstechniken sind größtenteils subjektiv geprägt und die Validierung bezieht sich auf einzelne Modell-Parameterdatensatz-Kombinationen. Letzterer Punkt bewirkt, dass die Validierung nur Vertrauen in das Modell in Kombination mit dem jeweiligen Parameterdatensatz erzeugt. Ziel der operativen Modellvalidierung sollte es jedoch sein, das Modell selbst – also unabhängig von einem gewählten singulären Parameterdatensatz – zu validieren.

Aus dem Stand der Technik und der Wissenschaft wird abschließend ein Konzept einer objektiven Validierungsmethode abgeleitet, die die Qualitätsmerkmale *Anforderungsbezug*, *Nachvollziehbarkeit*, *Praktikabilität* und *durchgängige Systematik* erfüllt. In ihr werden die essentiellen Bestandteile einer operativen Modellvalidierung in eine anwendungsunabhängige Prozessstruktur gebracht. In dieser Struktur werden objektivierbare Validierungstechniken eingebettet. Dieses Validierungskonzept verfolgt das Ziel des systematischen Vertrauensnachweises in das Modell selbst durch eine statistische Absicherung der Modellgüte bzw. der durch diese hervorgebrachten Simulationsergebnisse.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Wissenschaftsphilosophische Betrachtung der Validierung	2
3 Validierung im Modellbildungsprozess	5
4 Motivation operativer Modellvalidierung	9
5 Validierungsprozesse	12
5.1 Turing-Test-Prozess nach Schruben (1980)	12
5.2 Testablauf nach Shannon (1981)	12
5.3 Auf Vertrauenskriterien basierender Prozess nach Gass und Joel (1981)	13
5.4 Grundsätze des Validierungsprozesses nach Landry et al. (1983-1996)	13
5.5 Prozess für erfolgreiche Simulationen nach Law und McComas (1991-2001)	14
5.6 Rahmenwerk für validierbare Modelle nach Hodges und Dewar (1992)	15
5.7 Quartett des Modellvalidierungsprozesses nach Oral und Kettani (1993)	15
5.8 Prozessdefinition und Qualitätsstufen nach Balci (1986-2004)	16
5.9 Rahmenwerk eines Stresstests nach Carson (2002)	18
5.10 Vier-Stufen-Prozess nach Logan, Nitta und Chidester (2002-2006)	19
5.11 Drei-Stufen-Prozess und Richtlinien nach Oberkampff und Trucano (2002-2008)	19
5.12 Fünf Prinzipien nach Refsgaard und Henriksen (2004)	21
5.13 Iterativer Acht-Stufen-Prozess nach Sargent (2000-2014)	22
5.14 V-Modell-basierter Prozess nach Kutluay (2013)	23
5.15 Validierungsprozess für die Praxis nach Klemmer et al. (2013)	24
5.16 Zusammenfassung der Validierungsprozesse (1980-2016)	24
6 Validierungstechniken.....	26
6.1 Überblick und Klassifizierung	26
6.2 Subjektive Validierungstechniken	28
6.2.1 Selbstprüfung	28
6.2.2 Augenscheinvalidierung	29
6.2.3 Visualisierung, Animation	29
6.2.4 Graphischer Vergleich	30
6.2.5 Turing-Test	30
6.3 Objektivierbare Validierungstechniken	31
6.3.1 Vergleichstest	31
6.3.2 Fehlerimplementierungstest.....	32
6.3.3 Feldtest.....	32

6.3.4	Funktionaler Test	32
6.3.5	Ereignisvalidierung	33
6.3.6	Prädiktive Validierung	33
6.3.7	Regressionstest	34
6.3.8	Modellanpassung	34
6.3.9	Test spezieller Eingangsgrößen	35
6.3.10	Sensitivitätsanalyse	36
6.3.11	Statistische Techniken	39
6.3.12	Hypothesentest	45
6.3.13	Submodelltest, Modultest	46
6.3.14	Top-Down-Test	46
6.3.15	Wissensbasierte Validierung	47
6.4	Maße für Modellvalidität	47
6.4.1	Validitätslabel	47
6.4.2	Validitätsskala	47
6.4.3	Metrisches Qualitätsmaß	48
7	Überblick über Validierungsstudien in der Fahrdynamik	50
7.1	Validierung von Fahrdynamikmodellen nach Allen et al.	52
7.2	Parameterschätzung und Validierung nach Alasty und Ramezani	54
7.3	Systematisierte Validierungsstudie nach Bernard und Clover	54
7.4	Validierung des Modells einer Sattelzugmaschine nach Cassara et al.	55
7.5	Validierungsstudie eines Fahrsimulators nach Garrot et al.	56
7.6	Validierungsstudie eines Fahrsimulators nach Heydinger et al.	56
7.7	Vertikaldynamische Validierung mit Parametertuning nach Hu	58
7.8	Validierung eines Brennstoffzellenantriebs nach Klemmer et al.	59
7.9	Querdynamische Modellvalidierung nach Kutluay und Winner	59
7.10	Parameteranpassungen in einer Validierungsstudie nach Mcnaull et al.	60
7.11	Validierungsstudie für ein Gespannmodell nach Milich et al.	61
7.12	Korrelationsmethodik zur Validitätsbestimmung nach Ozan et al.	61
7.13	Statistischer Vergleich in einer Validierungsstudie nach Sarin et al.	62
7.14	Einzelfahrmanöver in der Fahrdynamik	62
8	Fazit und Konzept einer objektiven Validierungsmethode	65
	Literaturverzeichnis	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Zeitliche Entwicklung der referenzierten wissenschaftlichen Publikationen.....	11
Abbildung 6-1: Ausgewählte Sensitivitätsanalysemethoden und deren Eigenschaften	38
Abbildung 8-1: Übersicht der anforderungsbasierten Modellvalidierungsmethode.....	66
Abbildung 8-2: Prozess einer objektiven Validierungsmethode.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über bestehende Validierungsstudien in der Fahrdynamik	50
Tabelle 2: Überblick über gebräuchliche, normierte Fahrmanöver	63

1 Einleitung

Die Validierung von Simulationsmodellen ist ein elementarer Prozess in der modellbasierten Forschung. Sie liefert den Beweis für den Nutzen und die Glaubwürdigkeit des Modells und damit der erzeugten Simulationsergebnisse. Da ohne die Durchführung einer Modellvalidierung jegliche Ergebnisse einer simulationsbasierten Studie – unabhängig von der Art des Simulationsmodells und des Forschungsgebiets – keine belastbare Aussage liefern, kommt diesem methodisch wichtigen Prozess besondere Bedeutung zu.

Dieser Bericht beinhaltet eine Übersicht über den Stand der Wissenschaft und der Forschung in der Validierung von Simulationsmodellen.

Kapitel 2 vergleicht zunächst die philosophischen Grundlagen der Validierung mit der aktuellen wissenschaftlichen Sichtweise. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Vereinbarkeit beider Standpunkte für moderne Validierungsstrategien eingegangen.

In Kapitel 3 erfolgen die Einordnung der Validierung in den Modellbildungsprozess sowie eine Abgrenzung der Validierung von den anderen Teilprozessen der Modellbildung, wie z.B. der Verifikation. Zudem werden die unterschiedlichen Formen und Anwendungsgebiete der Validierung beschrieben.

Nachfolgend liegt der Schwerpunkt auf der operativen Modellvalidierung. Die Motivation und die sowohl wissenschaftliche als auch praktische und wirtschaftliche Bedeutung werden in Kapitel 4 aufgezeigt.

Die beiden Kapitel 5 und 6 zeigen die Bandbreite und die unterschiedlichen Ausführungsformen der bis heute definierten und entwickelten Validierungsprozesse und -techniken, aus deren Kombination sich unterschiedlichste Validierungsmethoden ergeben. Anhand dieser Übersicht von Entwicklungsfortschritten und Forschungsergebnissen wird verdeutlicht, wie die Glaubwürdigkeit in ein Simulationsmodell durch strukturiertes Vorgehen und die passende Auswahl bestehender Validierungstechniken gestärkt werden kann.

In Kapitel 7 wird die Bandbreite bestehender Validierungsstudien im Bereich der Fahrdynamiksimulation aufgezeigt. Der Fokus liegt auf der Art der verwendeten Modelle, den Anwendungsbereichen sowie der methodischen und fachlichen Ausrichtung der Validierungsstrategie.

Abschließend werden in Kapitel 8 – basierend auf einer Zusammenfassung der zuvor aufgeführten Erkenntnisse – die Objektivierungspotenziale systematischer Modellvalidierungsmethoden aufgezeigt, die Gegenstand derzeitiger Forschung zur Weiterentwicklung und Verbesserung von Validierungsstrategien sind.

2 Wissenschaftsphilosophische Betrachtung der Validierung

Das Thema *Validierung von Simulationsmodellen* wird in der Literatur aus zwei – teilweise sehr unterschiedlichen – Sichtweisen betrachtet. Während in der Wissenschaftsphilosophie Modelle wie wissenschaftliche Theorien behandelt werden¹, wird in der Simulationspraxis ein häufig sehr pragmatischer Ansatz für die Modellvalidierung gewählt², was sich bereits in der dort üblichen binären Bewertung eines Modells mit den Begriffen *valide* und *nicht-valide* bzw. *invalide* äußert.

Klein und Herskovitz weisen 2005 in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung auf diese Diskrepanz hin. Sie beklagen, dass die Computersimulationen seit vielen Jahren einen technologisch und wissenschaftlich getriebenen Fortschritt erfahren, während die theoretische Behandlung der Simulationen auf einem rudimentären und unterentwickelten Stand verharrt.³ Dies äußert sich auch im zeitlichen Verlauf der relevanten wissenschaftlichen Veröffentlichungen, der in Kapitel 4 beschrieben wird.

Vor dem Hintergrund, dass bis heute keine einheitliche methodische Grundlage entwickelt wurde und sich kein universeller Prozess für die Validierung von Simulationsmodellen durchgesetzt hat, geben Kleindorfer et al. in ihrem Paper eine Übersicht⁴ über die unterschiedlichen philosophischen Sichtweisen und fassen die jeweiligen Schwerpunkte sowie die jeweilige Beweisführung zusammen. Sie vertreten die Auffassung, dass die Validierung ein ethisches Problem ist, mit dem der Anwender verantwortlich umgehen muss, und dass er die Berechtigung seines Modells wissenschaftlich vertreten muss.⁵

In ihrer Veröffentlichung schaffen Klein und Herskovitz eine theoretische Grundlage für die Validierung, indem wissenschaftsphilosophische Erkenntnisse auf die Simulationsvalidierung Anwendung finden. Diese Erkenntnisse basieren auf den Kernelementen von Karl Poppers Theorie des Falsifikationismus, die er in seinem Werk *The Logic of Scientific Discovery*⁶ beschreibt. Die wichtigste Grundlage des Falsifikationismus ist, dass Theorien falsifizierbar sein müssen und solange falsifizierbar sind, bis sie durch einen Beweis falsifiziert wurden. Das heißt, dass das Auftreten eines einzigen Gegenbeweises jederzeit zur Falsifikation der Theorie führt – unabhängig davon, wie viele Ereignisse die Theorie vorher bekräftigt haben.

Ein sowohl von Popper⁷ als auch von Klein und Herskovitz⁸ angewandtes Beispiel zur Veranschaulichung des Sachverhalts ist die Theorie, die besagt, dass alle Schwäne weiß sind. Je mehr weiße Schwäne im vermeintlichen geographischen Gültigkeitsbereich beobachtet werden, desto größer wird

¹ Vgl. Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science, 1998, S. 1087.

² Vgl. Klein, Herskovitz: Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation, 2005, S. 303.

³ Vgl. Klein, Herskovitz: Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation, 2005, S. 303 f.

⁴ Vgl. Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science, 1998, S. 1090.

⁵ Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science, 1998.

⁶ Popper: The Logic of Scientific Discovery, 2005.

⁷ Vgl. Popper: The Logic of Scientific Discovery, 2005, S. 4, 82 f, 376 ff, 442 ff.

⁸ Vgl. Klein, Herskovitz: Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation, 2005, S. 307.

das Vertrauen in die aufgestellte Hypothese. Laut Popper werden Theorien durch empirische Beobachtungen bekräftigt, sie können jedoch nie verifiziert werden.⁹ Bezogen auf das Beispiel führt das Auftreten eines einzigen nicht-weißen Schwans zur Falsifikation der Theorie. Eine etwaige Anpassung der Hypothese, indem der Gültigkeitsbereich weiter eingeschränkt wird – im genannten Beispiel nämlich reduziert um den geographischen Raum, wo der nicht-weiße Schwan aufgetreten ist – führt in Folge wieder zu einer angepassten, falsifizierbaren Theorie. Klein und Herskovitz vereinen diese philosophischen Erkenntnisse mit dem praktischen Validierungsprozess über eine von Kleindorfer et al. geprägte Erkenntnis:

„The validation problem in simulation is an explicit recognition that simulation models are like miniature scientific theories. Each of them is a set of propositions about how a particular [...] system works. As such, the warrant we give for these models can be discussed in the same terms that we use in scientific theorizing in general.“^{10,11}

Poppers Falsifikationismus ist damit auch eine philosophische Grundlage für die praktische Modellvalidierung. In dieser wenden Forscher zur Validitätsbewertung ihrer Modelle Versuche an, um ihre Hypothesen bzw. Modellannahmen empirisch zu testen. Zu Beginn ist jedes Modell als Hypothese zu betrachten, die besagt, dass das erstellte Modell das abzubildende System für einen definierten Anwendungsbereich in allen Fällen mit dem gewünschten Genauigkeitsmaß repräsentiert. Der Validierungsprozess hat die Aufgabe, diese Hypothese zu bekräftigen oder zu falsifizieren.¹² Typischerweise werden hierzu auch statistische Hypothesentests angewendet.¹³ Es liegt in der Natur der empirischen Forschung, dass dabei die Methode der Induktion Anwendung findet. Das bedeutet, dass der Wissenschaftler versucht, von speziellen empirischen Beobachtungen auf das Allgemeine, d.h. auf eine Theorie oder Hypothese, zu schließen. Als wissenschaftliche Regeln kommen in der Praxis der Rationalismus und die Empirie zum Einsatz. Demnach werden Aussagen entweder basierend auf einem Prinzip oder basierend auf einem Beweis gerechtfertigt.¹⁴

Zwei Fehler sollten bei der Modellvalidierung in jedem Fall verhindert werden. Diese sind die Selbsttäuschung des Modellentwicklers und das unsystematische Verändern des Modells zur Erreichung besserer Übereinstimmung zwischen Modell und realem System, ohne die Gründe der vorherrschenden Abweichung zu identifizieren bzw. für die Modifikation zugrunde zu legen. Unter Selbsttäuschung ist die Identifikation nicht vorhandener Modelleigenschaften oder das Übersehen wichtiger

⁹ Vgl. Popper: *The Logic of Scientific Discovery*, 2005, S. 248.

Vgl. Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*, 2005, S. 309.

¹⁰ Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: *Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science*, 1998, S. 1087.

¹¹ Sinngemäße Übersetzung des Zitats:

Das Validierungsproblem in der Simulation ist eine ausdrückliche Erkenntnis, dass Simulationsmodelle wie komprimierte wissenschaftliche Theorien zu behandeln sind. Jede von ihnen stellt einen Satz von Behauptungen dar, wie ein bestimmtes System funktioniert. Als solcher können die Zusicherungen, die wir für dieses Modell aussprechen, in gleicher Form diskutiert werden, wie es bei wissenschaftlichen Theorien üblich ist.

¹² Vgl. Babuska, Oden: *V&V in Computational Engineering and Science*, 2003, S. 3.

¹³ Vgl. Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*, 2005, S. 307 ff.

Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2009, S. 165 f.

¹⁴ Vgl. Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*, 2005, S. 309.

Modelleigenschaften zu verstehen, was in systematischen Fehlern des Entwicklers bzw. des Modellprüfers begründet ist.¹⁵

Wie Kleindorfer et al. aufzeigen, ist der Falsifikationismus eine von mehreren möglichen philosophischen Grundlagen der Modellvalidierung.¹⁶ Seine Vorteile, die aus der bisherigen Forschung an Validierungsmethoden hervorgehen, sind die Praktikabilität, die Gestattung systematischer Vorgehensweisen und die klare Hervorhebung, dass Modellgültigkeit nur statistisch bekräftigt aber nie verifiziert werden kann. Bezogen auf die Computersimulation bedeutet der letzte Punkt, dass mit erhöhtem Validierungsaufwand das Vertrauen in die Ergebnisse gesteigert werden kann, ein verifizierter Gültigkeitsnachweis jedoch nach wie vor nicht möglich ist. Aus diesem Grund darf streng genommen auch niemals von einem validen Simulationsmodell gesprochen werden. Aus wissenschaftsphilosophischer Sicht wäre die Formulierung, dass dem Modell keine Invalidität nachgewiesen werden kann bzw. dass das Modell nicht invalide ist, korrekt. Dennoch ist es nach aktuellem Forschungsstand üblich, das Modell als valide zu bezeichnen und es als solches zu akzeptieren, wenn das reale Systemverhalten mit den Ausgangsgrößen des Modells ausreichend genau übereinstimmt und dem Modell somit keine Ungültigkeit nachgewiesen werden kann.¹⁷

¹⁵ Vgl. Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*, 2005, S. 309.

¹⁶ Vgl. Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: *Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science*, 1998, S. 1090.

¹⁷ Vgl. Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*, 2005, S. 309.

3 Validierung im Modellbildungsprozess

Die systematische Modellbildung und deren Qualitätssicherung sind mit klar definierten Prozessen verbunden, über deren Definition und Abgrenzung eine Vielzahl von Veröffentlichungen besteht, die bis in die 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückreichen.

Das *SCS Technical Committee on Model Credibility* hat im Jahr 1979 einen Standardsatz von Definitionen mit dem Titel *Terminology for model credibility*¹⁸ veröffentlicht, auf den auch heute noch referenziert wird, wenn es um Prozess- und Begriffsdefinitionen in diesem Bereich geht.

Sargent, ein emeritierter Professor der Syracuse University, veröffentlicht seit ungefähr vier Jahrzehnten zu seinen Forschungsbereichen *Methodik der Modellbildung*, *diskrete Ereignissimulation*, *Modellvalidierung* und *Leistungsbewertung*. Er ist bekannt für seine Forschungsarbeiten im Bereich der Validierung von Simulationsmodellen und hat eine Vielzahl von Validierungstechniken, -ansätzen und -methoden entwickelt.¹⁹

Den Bezug der Verifikation und der Validierung zum Modellbildungsprozess stellt Sargent vereinfacht in einem Beziehungsdreieck des (1) Systems (Problem Entity), des (2) konzeptionellen Modells (Conceptional Model) und des (3) ausführbaren Computer- bzw. Simulationsmodells (Computerized Model) dar.²⁰ Die aufgezeigten Beziehungen finden allgemeine Akzeptanz und stimmen in den wesentlichen Aussagen und Begriffsverwendungen mit den Prozessbeschreibungen anderer Wissenschaftler, wie z.B. derjenigen von Balci²¹, der Darstellung von Birta und Özmizrak²², der Beschreibung von Refsgaard und Henriksen²³ sowie der Ausführung von Tsang²⁴ überein.

Unter *Problem Entity (System)* ist das zu simulierende System – in der Regel ein reales System in einer realen Anwendung – zu verstehen. Das *konzeptionelle Modell (conceptual model)* stellt die mathematische Beschreibung des Systems für definierte und klar abgegrenzte Anwendungsfälle dar. Die Funktionen und Eigenschaften des Modells, die aus den Modellanforderungen abzuleiten sind, werden hierin beschrieben. Dazu ist es erforderlich, auch die Systemsensitivitäten, die Anwendungsbe-
reiche und -zustände sowie die Systemzustände zu spezifizieren.²⁵ Die Implementierung des konzep-

¹⁸ Schlesinger: Terminology for model credibility, 1979.

¹⁹ Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 176.

Vgl. Webseite: <http://eng-cs.syr.edu/about-the-college/faculty-and-staff/sargent>, Aufruf: 21.02.2016.

²⁰ Entsprechende Abbildung siehe Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164.

²¹ Balci: Requirements for Model Development Environments, 1984.

²² Birta, Özmizrak: A Knowledge-Based Approach for the Validation of Simulation Models: The Foundation, 1996.

²³ Refsgaard, Henriksen: Modelling guidelines - terminology and guiding principles, 2004.

²⁴ Tsang: A broad view of model validation, 1989.

²⁵ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 744.

tionellen Modells auf einem Computer wird als *Computermmodell* (*computerized model*) oder *Simulationsmodell* bezeichnet. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass es zeitlich ausgeführt werden kann und damit eine operative Funktion aufweist.²⁶

Jeder Modellbildungsprozess sollte mit einer Modellvalidierung und einer Modellverifikation verbunden sein. Die Prozesse werden in ihrer Kombination auch häufig unter dem Kürzel *V&V* (*Verifikation und Validierung* bzw. *Verification and Validation*) zusammengefasst. Aus der Literatur lassen sich viele Definitionen dieser Prozesse entnehmen.

Die *Verifikation* (*Computerized Model Verification*) findet ausschließlich auf Modellebene statt und bezeichnet den Prozess für die Sicherstellung bzw. den Nachweis, dass das konzeptionelle Modell formal richtig in das Computermmodell implementiert wurde und dass durch die Diskretisierung keine Berechnungsfehler auftreten. Umgangssprachlich beschäftigt sich die Verifikation mit der Frage: Ist das Modell richtig (implementiert)?²⁷

²⁶ Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2009, S. 164.

Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: *Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models*, 2011, S. 744 ff.

²⁷ Vgl. u.a. Schlesinger: *Terminology for model credibility*, 1979, S. 104.

Vgl. u.a. Kutluay, Winner: *Validation of vehicle dynamics simulation models - a review*, 2014, S. 187.

Vgl. u.a. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2009, S. 164.

Vgl. u.a. Babuska, Oden: *V&V in Computational Engineering and Science*, 2003, S. 3, 6.

Vgl. u.a. Banks: *Principles of Simulation*, 1998, S. 22.

Vgl. u.a. Oberkampff, Barone: *Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics*, 2006, S. 7.

Vgl. u.a. Refsgaard, Henriksen: *Modelling guidelines - terminology and guiding principles*, 2004, S. 75.

Vgl. u.a. Carson: *Model Verification and Validation*, 2002, S. 52.

Vgl. u.a. VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, 2004, S. 117.

Die *Validierung* findet stets auf der Schnittstelle zwischen Modell und (realem) System statt. Entsprechend zahlreicher Definitionen aus der Literatur hat der Validierungsprozess die Aufgabe, einen Nachweis über die Eignung des Modells für dessen Anwendungszweck zu liefern. Unter Eignung ist die Repräsentationsgenauigkeit des realen Systems, die eine Anforderung an das Modell darstellt, zu verstehen. Der Validierung liegt somit die Frage zugrunde: Wird das richtige Modell verwendet?²⁸

Nach Schlesinger werden die *konzeptionelle Modellvalidierung* und die *operative Modellvalidierung* unterschieden. Die *konzeptionelle Validierung* ist verbunden mit einer Systemanalyse und Bestandteil der Systemmodellierung. Sie dient dem Nachweis, dass die Theorien und Annahmen, die dem konzeptionellen Modell zugrunde liegen, korrekt sind und dass sie das System für den jeweiligen Anwendungszweck verlässlich beschreiben.²⁹ Klemmer et al. bezeichnen diesen Prozess als *Qualifikation*.³⁰ Im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation werden hier insbesondere physikalische Zusammenhänge betrachtet. Die *operative (Modell-) Validierung* basiert auf dem operativen Vergleich des realen Systems mit dem Computermode. Sie soll nachweisen, dass die Ausgangsgrößen des Modells und damit die Ergebnisse, die das Simulationsmodell liefert, mit dem realen Systemverhalten im definierten Anwendungsbereich in ausreichender Genauigkeit übereinstimmen. Die operative Validierung setzt die Durchführung von Experimenten voraus, um Vergleichsdaten zwischen realem System und Simulation zu erheben.³¹

²⁸ Vgl. u.a. Schlesinger: Terminology for model credibility, 1979, S. 204.

Vgl. u.a. Kutluay, Winner: Validation of vehicle dynamics simulation models - a review, 2014, S. 187.

Vgl. u.a. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 744 f.

Vgl. u.a. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 15.

Vgl. u.a. Oberkamp, Barone: Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics, 2006, S. 7.

Vgl. u.a. Refsgaard, Henriksen: Modelling guidelines - terminology and guiding principles, 2004, S. 75.

Vgl. u.a. Babuska, Oden: V&V in Computational Engineering and Science, 2003, S. 3.

Vgl. u.a. Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 52.

Vgl. u.a. Law, McComas: How to Build Valid and Credible Simulation Models, 2001, S. 26.

Vgl. u.a. Banks: Principles of Simulation, 1998, S. 22.

Vgl. u.a. Miser: A foundational concept of science appropriate for validation in operational research, 1993, S. 212.

Vgl. u.a. Balci: Requirements for Model Development Environments, 1984, S. 57.

Vgl. u.a. VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004, S. 117.

Vgl. u.a. VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2003, S. 20 f.

²⁹ Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164.

³⁰ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 744.

³¹ Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164.

Datenvalidität (data validity) bezeichnet die Verwendung richtiger, genauer, unabhängiger und vollständiger Daten für die Modellparametrierung und -ausführung.³² Sie ist eine essentieller Voraussetzung der operativen Modellvalidierung, da sich Parametrierungsfehler ebenso negativ auf das Vergleichsergebnis von Versuchs- und Simulationsdaten auswirken können wie Modellinvalidität.

Es ist zu berücksichtigen, dass jedes Modell ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit ist und damit nie absolute Übereinstimmung zwischen Systemverhalten und Modellausgangsdaten erreicht werden kann.³³ Deshalb ist an das Modell eine Genauigkeitsanforderung zu stellen. Modelle sollten jedoch nur so detailliert sein, wie es zur Erfüllung der Modellanforderungen notwendig ist, da mit steigender Komplexität der Aufwand, die Rechenzeit und die Fehleranfälligkeit des Modells ansteigen.³⁴

³² Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 164.

Vgl. Balci: Requirements for Model Development Environments, 1984, S. 57.

³³ Vgl. VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Begriffe, 2003, S. 20 f.

³⁴ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 744.

4 Motivation operativer Modellvalidierung

Vor dem Hintergrund, dass in heutigen wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen teilweise sehr komplexe Modelle und kommerzielle Simulationssoftware zum Einsatz kommen, sind Validierungsmethoden erforderlich, die eine Modellbewertung anhand dessen operativen Verhaltens ermöglichen und damit keine direkte Kenntnis des konzeptionellen Modells erfordern. Dies ist die Aufgabe der operativen Modellvalidierung.³⁵

Balci und Nance weisen auf die Bedeutung der Modellvalidierung wie folgt hin:

“It has been said, that a problem correctly formulated is half solved. Albert Einstein once indicated that the correct formulation of a problem was even more crucial than its solution. The ultimate goal is not to find a solution to a problem but to produce a correct one that will be accepted and used.”^{36,37}

Sie adressieren damit präzise die Aufgabe und Herausforderung der Modellentwicklung, die durch die Modellvalidierung nachzuweisen ist. Es ist nicht schwer, ein Modell zu erstellen, das eine Information liefert. Die Herausforderung ist die Erstellung eines Modells, das eine richtige Information bzw. Aussage in der gewünschten und erforderlichen Genauigkeit liefert. Der Nachweis hierfür ist über den Validierungsprozess zu erbringen, der letztlich zum Erreichen des wichtigsten Ziels entscheidend ist, nämlich dem Vertrauen in die Simulationsergebnisse. Nur wenn dieser Nachweis erbracht ist, kann auf zusätzliche Versuche und Beobachtungen des realen Systems verzichtet werden. Dies ist besonders relevant für industrielle Anwendungen, z.B. in der Fahrzeugentwicklung. Schramm et al. schreiben, dass „[d]er Einsatz von komplexen mathematischen Fahrzeugmodellen zur Simulation und zum Entwurf von Kraftfahrzeugsystemen und Anwendungen [...] in den letzten Jahren mehr denn je zuvor an Bedeutung gewonnen [hat].“³⁸ Sie nennen hierfür sowohl wirtschaftliche als auch technologische Gründe. Hierzu zählen die Variantenvielfalt, die Komplexität der Systeme sowie deren Absicherung, die Reproduzierbarkeit der Randbedingungen in der Simulation, die stetig kürzer werdenden Entwicklungszyklen und der steigende Marktdruck, der die Minimierung der Entwicklungskosten vorantreibt.³⁹ Aber auch für wissenschaftliche Untersuchungen ist die Validierung essentiell. Wenn der Forscher die Eignung seines Untersuchungswerkzeugs nicht nachweist, haben die aus seinen Simulationen gewonnenen Erkenntnisse keine praktische Relevanz, weil keine Vertrauensgrundlage geschaffen wurde.

In Kapitel 2 wurde beschrieben, dass Modellvalidität nicht verifizierbar ist, aber mit zunehmenden Untersuchungen – d.h. mit steigendem Validierungsaufwand – das Vertrauen in das Modell gesteigert

³⁵ Vgl. Sargent: *Verifying and Validating Simulation Models*, 2014, S. 124.

Vgl. Kapitel 3.

³⁶ Balci, Nance: *Formulated problem verification as an explicit requirement of model credibility*, 1985, S. 76.

³⁷ Sinngemäße Übersetzung des Zitats:

Es ist erwiesen, dass ein korrekt formuliertes Problem bereits die halbe Lösung darstellt. Albert Einstein hat einst aufgezeigt, dass die korrekte Problemformulierung deutlich entscheidender war als die Lösung des Problems. Das endgültige Ziel ist nicht, eine Problemlösung zu finden, sondern eine korrekte Lösung zu erzeugen, die akzeptiert wird und Anwendung findet.

³⁸ Schramm, Hiller, Bardini: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, 2013, S. 1.

³⁹ Vgl. Schramm, Hiller, Bardini: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, 2013, S. 1 f.

werden kann. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass das Adjektiv *valide* keine Komparation und auch keinen Superlativ besitzt. Deshalb wird z.B. von Sargent ergänzend der Begriff *Modellvertrauen* verwendet. Während die Validität eine feste Eigenschaft des Modells ist, stellt das Modellvertrauen ein Maß für den Nachweis der Validität dar.⁴⁰ Sargent zeigt, dass das Modellvertrauen auch einen wirtschaftlichen Aspekt hat, da der Validierungsprozess mit Zeit und Kosten verbunden ist. In einem Diagramm⁴¹ veranschaulicht er, dass eine grundlegende Absicherung des Modells mit verhältnismäßig geringen Kosten erreicht werden kann. Ist es jedoch erforderlich, ein sehr hohes Modellvertrauen zu erzielen – z.B. weil mittels Simulationen sicherheitsrelevante Entscheidungen getroffen werden sollen – und damit das Modell für seinen Einsatzzweck umfassend abzuschern, ist der Validierungsprozess mit signifikanten Kosten und hohem Aufwand verbunden, was sich im progressiven Anstieg der Kosten widerspiegelt.⁴² Harmon et al. weisen passend hierzu mathematisch nach, dass die Validierung von Simulationsmodellen das Projektrisiko senkt.⁴³

Abbildung 4-1 zeigt den zeitlichen Publikationsverlauf der in diesem Bericht referenzierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Hierin berücksichtigt sind – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – Veröffentlichungen, die Validierungsprozesse, Validierungstechniken und Validierungsbeispiele aus der Praxis beschreiben. Auffällig ist, dass im Zeitraum um die Jahrtausendwende die Veröffentlichungsrate ihr Maximum erreicht. Generell ist der steigende Verlauf von ca. 1965 bis 2000 ein Indikator für die zunehmende Bedeutung der Simulation in der Forschung und Entwicklung. Der darauffolgende Abfall der Veröffentlichungsrate unterstützt die in Kapitel 2 beschriebene Aussage von Klein und Herskovitz, dass die theoretische Behandlung von Simulationsergebnissen auf einem unterentwickelten Stand verharret, während die Computersimulationen selbst große Fortschritte erfahren.⁴⁴

⁴⁰ Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 162 f.

⁴¹ Entsprechende Abbildung siehe Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 163.

⁴² Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 162 f.

⁴³ Vgl. Harmon, Gross, Youngblood: Why Validation?, 1999.

⁴⁴ Vgl. Klein, Herskovitz: Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation, 2005, S. 303 f.

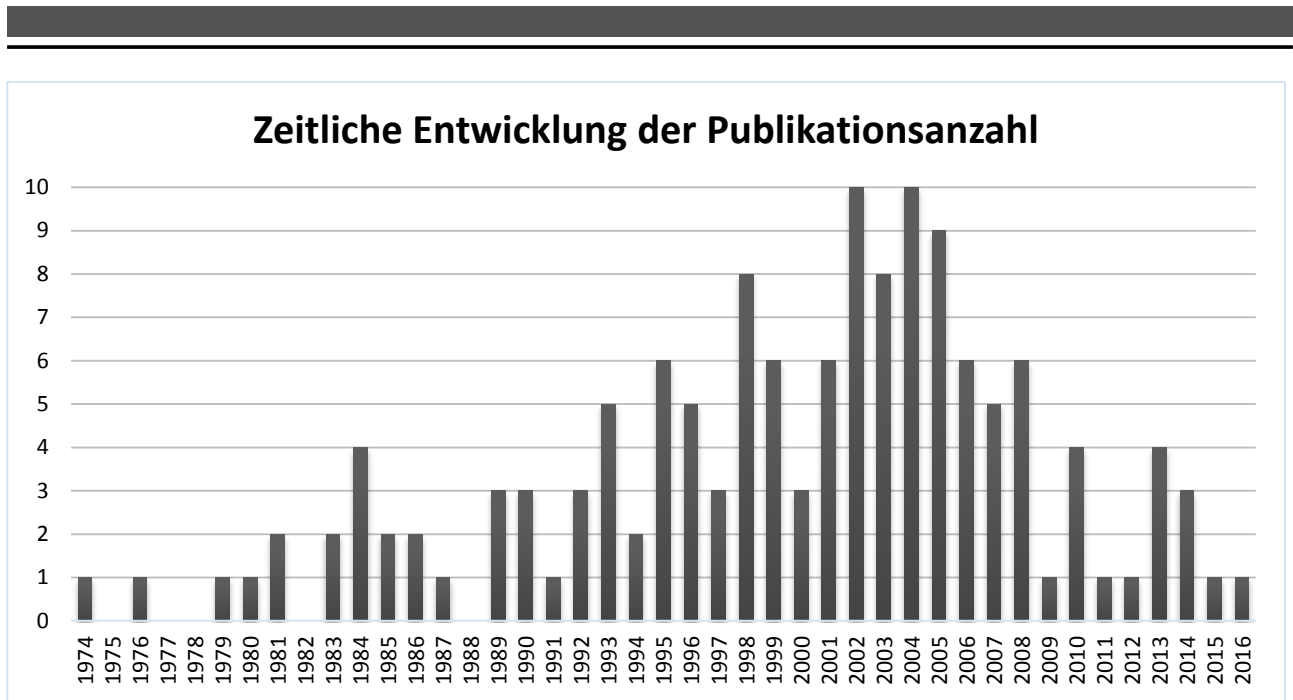


Abbildung 4-1: Zeitliche Entwicklung der referenzierten wissenschaftlichen Publikationen

5 Validierungsprozesse

Der Validierungsprozess gibt das Vorgehen für den Glaubwürdigkeitsnachweis eines Modells vor. In der Literatur gibt es dafür unterschiedlichste Prozessdefinitionen, die als gemeinsames Ziel den Vertrauensnachweis für das Modell verfolgen, aber hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, der Bewertungskriterien, ihrer Komplexität und des Umsetzungsaufwands große Unterschiede aufweisen. Hieraus ergibt sich, dass ein direkter Vergleich der bestehenden Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen nicht möglich ist. Die nachfolgenden Kapitel zeigen deshalb, wie sich die Komplexität und die Systematik der Prozesse seit 1980 entwickelt haben, wie sich diese Definitionen gegenseitig ergänzen und wo gegensätzliche Ansichten vorzufinden sind.

5.1 Turing-Test-Prozess nach Schruben (1980)

Schruben beschreibt im Jahr 1980 einen Prozess, der auf dem Fachwissen einer Führungskraft bzw. eines Experten, dem gemischte Simulations- und Messergebnisse ohne Herkunftskennzeichnung vorgelegt werden, basiert. Die Aufgabe der Führungskraft ist die Bewertung der einzelnen Ergebnisse als wahr oder falsch. Das Modell gilt dann als valide, wenn der Experte die Simulationsdaten ebenso wie die realen Messdaten als wahr bewertet. Die Beurteilung realer Messdaten als falsch würde die Unwissenheit bzw. Nicht-Eignung des Experten nachweisen. Dem Konzept liegt der klassische Hypothesentest zugrunde.⁴⁵ Es handelt sich hierbei um eine Prozessdefinition des heutigen Turing-Tests – einer Validierungstechnik, die in Kapitel 6.2.5 näher beschrieben wird.

5.2 Testablauf nach Shannon (1981)

Shannon wählt einen analytischeren Bewertungsansatz als Schruben, indem er die möglichen Fehler (wie z.B. Definitionsfehler, Spezifizierungsfehler, Missverständnis und Interpretationsfehler) im Modellbildungsprozess untersucht und den Elementen *reales System*, *konzeptionelles Modell*, *Versuchsumgebung*, *formales Modell*, *Computermode*ll und *Versuch* zuordnet.⁴⁶ Für die Verifikations- und Validierungstests nennt er vier Ansätze: (1) Nutzung fester Daten für alle Parameter und Variablen, (2) Test des Modells in Bezug auf ein anderes analytisches Modell, (3) Methoden basierend auf Daten des realen Systems, (4) statistische Analysen. Auf ein Modell müssen sowohl Tests zur Plausibilitätsprüfung, zur Modellstruktur, zum Modellverhalten und zum Änderungsverhalten angewendet werden. Shannon schreibt, dass dies einen notwendigen aber zugleich auch aufwändigen Ansatz darstellt.⁴⁷

⁴⁵ Vgl. Schruben: Establishing the credibility of simulations, 1980, S. 101 f.

⁴⁶ Vgl. Shannon: Tests for the verification and validation of computer simulation models, 1981, S. 575.

⁴⁷ Vgl. Shannon: Tests for the verification and validation of computer simulation models, 1981, S. 575 ff.

Dies wird durch folgende Aussage verdeutlicht:

“It is fairly easy for the modeller to be convinced of the validity of the model. It is far more difficult and more critical to convince the user.”^{48,49}

5.3 Auf Vertrauenskriterien basierender Prozess nach Gass und Joel (1981)

Gass und Joel nennen in ihrer Veröffentlichung ein wesentliches Problem der Simulation, das in der Praxis schon damals weit verbreitet war. Sie schreiben in Analogie zu dem in Kapitel 5.2 aufgeführten Zitat von Shannon, dass allen entscheidungsunterstützenden Modellen die Sicht des Modellentwicklers zugrunde liege und es deshalb für Entscheidungsträger schwierig sei, den Modellaussagen zu vertrauen.⁵⁰ Zur Problemlösung fehlt der Nachweis über die Modellvalidität. Sie schlagen deshalb einen pragmatischen Ansatz vor, der eine Modellanalyse fordert und damit eine wissenschaftliche und systematische Vorgehensweise ermöglicht. Kernpunkt sind die sieben Vertrauenskriterien: (1) Modelldefinition, (2) Modellstruktur, (3) Modelldaten, (4) Computermodeilverifikation, (5) Modellvalidierung, (6) Modellanwendbarkeit und (7) Modellherkunft. Nach Gass und Joel soll für jedes Kriterium das Vertrauensmaß auf einer Skala von 1 bis 5 angegeben werden, sodass für den Entscheidungsträger die Belastbarkeit der Modellaussagen daraus unmittelbar ersichtlich ist. Die Autoren beschreiben beispielhafte Definitionen für die Stufen der Skalen. Ein objektives Maß wird jedoch nicht definiert. Das eingeführte Label wird in Kapitel 6.4.1 beschrieben.⁵¹

5.4 Grundsätze des Validierungsprozesses nach Landry et al. (1983-1996)

Landry et al. geben einen Überblick über den Entwicklungsprozess der Modellvalidierung. Sie schildern, dass der Prozess zunächst durch die drei Bereiche der Wissenschaftsphilosophie (1) Rationalismus⁵², (2) Empirismus⁵³ und (3) Positivismus⁵⁴ geprägt war. Naylor und Finger kombinierten diese Positionen in einen dreistufigen Prozess. Im Laufe der Zeit änderte sich die Art der adressierten Probleme, sodass die Untersuchungswerkzeuge verbessert wurden und die Experten eine andere Rolle einnahmen.⁵⁵ Der Fokus von Landrys und Orals Veröffentlichung liegt auf der Umsetzung von Validierungsprozessen in der Unternehmensforschung.⁵⁶

⁴⁸ Shannon: Tests for the verification and validation of computer simulation models, 1981, S. 577.

⁴⁹ Sinngemäße Übersetzung des Zitats:

Es ist sehr einfach für einen Modellentwickler, von der Validität seines Modells überzeugt zu sein. Es ist deutlich schwieriger aber entscheidender, den Modellnutzer von der Validität zu überzeugen.

⁵⁰ Vgl. Gass, Joel: Concepts of Model Confidence, 1981, S. 341.

⁵¹ Vgl. Gass, Joel: Concepts of Model Confidence, 1981, S. 342 ff.

⁵² Rationalismus = Logische Betrachtung und Konzentration auf die syntaktischen Aspekte der Modelle.

⁵³ Empirismus = Übereinstimmung von Fakten und Konzentration auf die semantischen Aspekte der Modelle.

⁵⁴ Positivismus = Prädiktive Funktion und Konzentration auf die pragmatischen Aspekte der Modelle.

⁵⁵ Vgl. Landry, Malouin, Oral: Model validation in operations research, 1983, S. 207 ff.

⁵⁶ Vgl. Landry, Oral: In search of a valid view of model validation for operations research, 1993, S. 161 ff.

Vgl. Landry, Banville, Oral: Model legitimisation in operational research, 1996, S. 443 ff.

Die Veröffentlichungen grenzen sich zu den früheren Prozessdefinitionen dadurch ab, dass die Bedeutung und der Nutzen valider Modelle im Fokus stehen. Landry et al. gehen weniger auf die Vorgehensmethodik und die Bewertungskriterien, sondern vielmehr auf den erforderlichen Umfang der Validierungsprozesse, ein und stellen damit eine notwendige Ergänzung für einen systematischen Gesamtprozess dar.

Der Modellvalidierungsprozess wird als Entscheidungssystem vorgestellt und die Punkte (1) Identifikation der Interessenvertreter, (2) Formulierung der Modell-Ziele, (3) Ermittlung von kritischen Faktoren, (4) Vertrauen in das Modell und (5) Kosten werden diskutiert.⁵⁷ Die wichtigsten Schlüsse und Grundsätze des Validierungsprozesses sind:⁵⁸

- Validität ist nicht nur der Grad der Repräsentation des realen Systems, sondern aller Modelleigenschaften, wie Anwendbarkeit, Nutzen, Kosten und Repräsentativität.
- Validierung ist nicht entkoppelt von der Modellierung.
- Im Modellvalidierungsprozess werden Entscheidungen getroffen, z.B. relevante Annahmen über das System, Bewertung der Wichtigkeit dieser Annahmen, Auswahl von Kriterien für unterschiedliche Arten von Validität, Bestimmung der Wichtigkeit dieser Validitätstypen, Akzeptanzmaß für die Kosten.
- Modellvalidität wird stets in einem Kontext betrachtet.
- Die aktive Teilnahme der Entscheidungsträger am Modellierungsprozess trägt zu höherer Validität bei.
- Die konzeptionelle Modellbildung ist die wichtigste und kritischste Phase im Gesamtprozess.

5.5 Prozess für erfolgreiche Simulationen nach Law und McComas (1991-2001)

Law und McComas beschreiben einen in mehrere Schritte unterteilten Ansatz zur Durchführung von Simulationsstudien in Anlehnung an den in Kapitel 3 beschriebenen Modellbildungsprozess nach Sargent. Sie diskutieren die Anwendung formaler statistischer Techniken für die Modellvalidierung und nennen Richtlinien für die Bereitstellung guter Modelldaten. Für die Modellvalidierung in einer erfolgreichen Simulationsstudie empfehlen sie lediglich einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem realen Systemverhalten, falls Messungen vorliegen, oder mit den Erwartungen, falls keine Daten des realen Systems vorliegen. Sie beschreiben jedoch auch, dass eine Sensitivitätsanalyse (siehe auch Kapitel 6.3.10) durchgeführt werden sollte, um einflussreiche Parameter des Modells zu identifizieren, die bei der Modellbildung besondere Aufmerksamkeit erfahren sollten. Dies ist ein erster objektiver Ansatz zur Systematisierung eines Teilprozesses in der Modellentwicklung.⁵⁹

⁵⁷ Vgl. Landry, Malouin, Oral: Model validation in operations research, 1983, S. 215 f.

⁵⁸ Vgl. Landry, Malouin, Oral: Model validation in operations research, 1983, S. 218 f.

⁵⁹ Vgl. Law, McComas: How to Build Valid and Credible Simulation Models, 2001, S. 22 ff.
Vgl. Law, McComas: Secrets of successful simulation studies, 1991, S. 21 f.

5.6 Rahmenwerk für validierbare Modelle nach Hodges und Dewar (1992)

Hodges und Dewar adressieren in ihrer Veröffentlichung Modelle für militärische Zwecke. Sie kritisieren den weit verbreiteten Standpunkt, dass alle Modelle durch einen Vergleich mit dem realen Systemverhalten validiert werden sollten. Sie beschreiben, dass bezüglich des Prozesses zunächst zwischen validierbaren und nicht-validierbaren Modellen unterschieden werden müsse, womit sie die Betrachtungsebene der Modellvalidierung gegenüber bisherigen Ansichten erweitern. Validierbare Modelle sind nach ihrer Auffassung geeignet, um Vorhersagen zu treffen. Die nicht-validierbaren Modelle hingegen erfordern eigene Bewertungsverfahren und dürften nur für nicht-prädiktive Zwecke eingesetzt werden. Hierzu zählen die Buchführung, die Darstellung von Ideen, das Trainieren eines bestimmten Verhaltens, das Koppeln an ein Managementsystem, das Unterstützen von Kommunikationen und die Förderung von Ideenfindungen und Hypothesenbildungen. Für die validierbaren Modelle definieren Hodges und Dewar ein Rahmenwerk. Im ersten Schritt ist eine Modellaussage über eine vom Modell zu registrierende Beobachtung vorherzusagen bzw. anzufordern. Im zweiten Schritt wird das Genauigkeitsmaß der Modellvorhersage definiert und im dritten Schritt muss eine Begründung erfolgen, warum ein Entscheidungsträger den Definitionen der ersten zwei Schritte glauben sollte. Sie sehen dieses Vorgehen als notwendige Anforderung für die Qualitätsbeurteilung. Ein Modell ist dann validierbar, wenn die zu modellierende Situation bzw. Anwendung die vier Anforderungen (1) Beobachtbarkeit und Messbarkeit, (2) zeitliche Konstanz der Struktur, (3) Konstanz bei nicht spezifizierten Umgebungsänderungen und (4) Verfügbarkeit ausreichender Daten erfüllt.⁶⁰

Hodges und Dewar erklären, dass Validität nicht binär ist, sondern kontinuierlich zwischen den beiden Bewertung *nicht valide* und *valide* verläuft.⁶¹ Ihre Veröffentlichung stellt ein Literaturbeispiel dar, in dem die wissenschaftsphilosophischen Grundlagen (siehe Kapitel 2) der Modellvalidierung keine explizite Berücksichtigung erfahren.

5.7 Quartett des Modellvalidierungsprozesses nach Oral und Kettani (1993)

Oral und Kettani unterscheiden vier Arten der Validierung, die von der Art der Untersuchung abhängig sind. Die Einordnung erfolgt entsprechend des Quartetts des Modellvalidierungsprozesses, das sie anhand eines Tetraeders⁶² visualisieren. Die vier Eckpunkte stellen die Basiselemente (1) Entscheidung, (2) formales Modell, (3) konzeptionelles Modell und (4) Management einer Simulationsstudie dar. Die vier Flächen des Tetraeders stehen für die vier unterschiedlichen Modellfacetten (1) Prototyp, (2) Systembeschreibung, (3) pragmatische Facette und (4) theoretische Beschreibung. Betrachtet man jede dieser Facetten für sich, ist sie mit jeweils drei von insgesamt sechs Validierungsprozessen verbunden, die durch die drei begrenzenden Kanten repräsentiert werden.⁶³ Oral und

⁶⁰ Vgl. Hodges, Dewar: Is It You or Your Model Talking? A Framework for Model Validation, 1992, S. v f.

⁶¹ Vgl. Hodges, Dewar: Is It You or Your Model Talking? A Framework for Model Validation, 1992, S. vi f.

⁶² Entsprechende Abbildung siehe Oral, Kettani: The facets of the modeling and validation process in operations research, 1993, S. 217.

⁶³ Vgl. Oral, Kettani: The facets of the modeling and validation process in operations research, 1993, S. 216 ff.

Kettani beschreiben, dass es nicht sinnvoll sei, einen extrem umfangreichen und universellen Gesamtvalidierungsprozess zu entwickeln, der alle möglichen Validierungsprozesse umfasst. Aufgrund der Individualität der unterschiedlichen Modelle solle die Konzentration auf einer der vier Modellfacetten liegen.⁶⁴ Die Veröffentlichung ist ein Beispiel für den sehr vielfältigen und komplexen Validierungsprozess, die Schwierigkeit, einen systematischen Nachweis für Modellglaubwürdigkeit zu erbringen, aber auch für die Subjektivität der Prozessbestimmung und -auslegung.

5.8 Prozessdefinition und Qualitätsstufen nach Balci (1986-2004)

Balci beschäftigt sich als Professor der Informatik in seinem Forschungsbereich *Modeling and Simulation* seit über 40 Jahren mit Methoden sowie der Verifikation, der Validierung und der Zertifizierung von Modellen.⁶⁵ Balci entwickelt Richtlinien zur Durchführung erfolgreicher Simulationsstudien. Diese Richtlinien betreffen den gesamten Ablauf einer Simulationsstudie von der Problemdefinition und -formulierung bis hin zu den Simulationsergebnissen, die von Entscheidungsträgern als vertrauenswürdig akzeptiert werden. Damit verbindet er als Erster die Komplexität sowie die vielfältigen Facetten der Validierung mit konkreten Teilprozessen und Untersuchungszielen. Der Lebenszyklus der Simulationsstudie stellt er in Form eines Prozessverlaufs⁶⁶ dar. Dieser umfasst zehn Prozesse, die Balci vorschlägt und näher beschreibt. Dadurch, dass Balci und Sargent auch gemeinsam geforscht und publiziert haben, ist es kein Zufall, dass dieser Lebenszyklus wesentliche Übereinstimmungen mit dem von Sargent veröffentlichten Modellierungsprozess aufweist (siehe Kapitel 3). Balci führt zudem Qualitätsstufen⁶⁷ – sogenannte *credibility assessment stages* – ein, die innerhalb der zehn Prozesse zu erfüllen sind. Diese sind in mehreren Ebenen hierarchisiert. In der ersten Ebene ist die Akzeptanz der Simulationsergebnisse von (1) der Präsentationsverifikation und (2) dem Glaubwürdigkeitsnachweis der Simulationsergebnisse abhängig. Für diese werden in der zweiten Ebene weitere Qualitätsstufen definiert (z.B. die Qualitätssicherung des experimentellen Modells), die wiederum in Ebene 3 näher spezifiziert werden.⁶⁸

Balci definiert 15 Prinzipien der Verifikation, der Validierung und des Testens (VV&T), die sich in seiner Forschung seit 1978 gefestigt haben.⁶⁹

1. VV&T muss während des gesamten Lebenszyklus eines Modells durchgeführt werden.

⁶⁴ Vgl. Oral, Kettani: The facets of the modeling and validation process in operations research, 1993, S. 232.

⁶⁵ Vgl. Webseite: manta.cs.vt.edu/balci/, Aufruf: 24.02.2016.

⁶⁶ Entsprechende Abbildung siehe Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 26.

⁶⁷ Entsprechende Abbildung siehe Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 28.

⁶⁸ Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 28.

⁶⁹ Vgl. Balci: Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification, and Testing, 1995, S. 148 ff.

Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 13 ff.

Vgl. Balci: Verification, Validation, and Accreditation, 1998, S. 42.

Vgl. Balci: Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models, 1997, S. 136.

-
2. Die Ergebnisse von VV&T sollten nicht zur binären Einstufung des Modells als vollständig richtig oder absolut falsch herangezogen werden.
 3. Ein Simulationsmodell wird für bestimmte Untersuchungsziele erstellt und seine Glaubwürdigkeit wird in Bezug auf diese Ziele bewertet.
 4. VV&T muss unabhängig durchgeführt werden, um Voreingenommenheit des Modellentwicklers auszuschließen.
 5. VV&T ist kompliziert und erfordert Kreativität.
 6. Modellglaubwürdigkeit kann nur für die Bedingungen, unter denen das Modell getestet wurde, eingefordert werden.
 7. Das vollständige Testen des Modells ist unmöglich.
 8. VV&T erfordert Planung und Dokumentation.
 9. Die Fehlertypen I, II und III müssen verhindert werden. Typ I ist die fehlerhafte Bewertung eines richtigen Modells als unglaubwürdig. Dies bezeichnet Balci auch als Risiko des Modellentwicklers. Typ II entspricht der Fehlentscheidung, dass ein unglaubwürdiges Modell als valide bewertet wird, was ein Risiko für den Modellnutzer darstellt. Typ III ist der Test des Modells in einem Anwendungsbereich, der nicht dem späteren Einsatzzweck entspricht und damit irrelevant ist.
 10. Fehler sollten so früh wie möglich im Lebenszyklus erkannt werden.
 11. Probleme, die Modelle mit mehreren abhängigen Ausgangsgrößen erfordern, müssen erkannt und sorgfältig gelöst werden.
 12. Erfolgreiches Testen aller Submodelle bewirkt nicht automatisch ein valides Gesamtmodell.
 13. Doppelte Validierungsprobleme müssen erkannt und sorgfältig gelöst werden.
 14. Modellvalidität alleine bedeutet nicht, dass die Simulationsergebnisse glaubwürdig und akzeptabel sind.
 15. Die Genauigkeit der Problemformulierung beeinflusst die Akzeptanz und Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse stark.

Balci beschreibt den Lebenszyklus und die Prozesse in zahlreichen Veröffentlichungen⁷⁰ anwendungsneutral und allgemeingültig. Seine Prozessdefinition ist ein sehr anschauliches Beispiel dafür, dass eine operative Modellvalidierung alleine noch nicht zu akzeptablen und nützlichen Simulationsergebnissen führt. Sind beispielsweise die Eingangsgrößen des Modells falsch, liefert die Simulation

⁷⁰ Balci: Credibility Assessment of Simulation Results: The State of the Art, 1986.

Balci: How to Assess the Acceptability and Credibility of Simulation Results, 1989.

Balci: Verification, Validation, and Accreditation, 1998.

Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998.

auch bei einem validierten Modell keine belastbaren Ergebnisse. Deshalb stellt die Datenvalidierung einen ebenso wichtigen Prozess dar wie die Modellvalidierung.

Für die Qualitätsprüfung eines Modellierungs- und Simulationsprozesses nennt Balci das Qualitäts-triangel der Einflussindikatoren (1) *Produkt*, (2) *Projekt* und (3) *Prozess*.⁷¹ Basierend darauf erforscht er die Qualitätsbeurteilung dieser drei Indikatoren. Bezüglich der Prozessqualität referenziert er auf zehn Qualitätsindikatoren, welche auf Forschungsarbeiten aus der Softwareentwicklung basieren. Diese sind (1) Akzeptanz, (2) Instandhaltbarkeit, (3) Qualität der Methodik, (4) Qualität der Methoden-anwendung, (5) Schnelligkeit, (6) Verlässlichkeit, (7) Robustheit, (8) Haltbarkeit, (9) Verständ-lichkeit und (10) Sichtbarkeit.⁷²

Balcis Veröffentlichungen sensibilisieren stark für die Notwendigkeit und Wichtigkeit systematischer Validierungsprozesse. Sie liefern zahlreiche methodische Ansätze zur systematischen Prozessgestal-tung und Prozessbewertung. Was fehlt, sind der Einblick in die praktische Umsetzung und die Nen-nung objektiver Bewertungsmaßstäbe.

5.9 Rahmenwerk eines Stresstests nach Carson (2002)

Carson wählt einen gänzlich anderen Prozessansatz als Balci, der sich – wie frühere Veröffentlichun-gen – auf die Modellfähigkeiten konzentriert und den Modellnutzen weniger stark adressiert. Er for-dert, dass die Modellentwickler oder die Modellnutzer das Simulationsmodell einem Stresstest unter-ziehen, um diesem Validität nachzuweisen. Der Stresstest ist eine definierte Validierungstechnik und wird in Kapitel 6.3.9 näher erläutert. Mit dem Wissen, dass jedes Modell fehlerhaft ist, sollte jedes Simulationsmodell und -ergebnis kritisch hinterfragt werden. Carson äußert Kritik an dem häufig blinden Vertrauen vieler Modellanwender in Simulationsergebnisse und bezeichnet dies als „student syndrome“⁷³ und „one run looks OK, so the model is correct“ syndrome⁷⁴. Er definiert vier Model-lierungsfehler, die bei der Modellüberprüfung beachtet werden müssen: (1) Projektmanagementfeh-ler, (2) Daten- / Datenmodellfehler, (3) logische Modellfehler und (4) Experimentfehler.⁷⁵

Zudem vertritt Carson die Auffassung, dass ein Modell, das für einen Anwendungszweck validiert wurde, auch für andere Anwendungszwecke valide ist, wenn dieser innerhalb des definierten Gel-tungsbereichs und Detaillierungslevels liegt.⁷⁶ Demnach muss ein Modell nicht genau für die zu un-tersuchenden Anwendungsfälle validiert werden, sondern der Vertrauensnachweis muss allgemein für den Gültigkeitsbereich, dem die einzelnen Anwendungsfälle unterliegen, erfolgen. Oberkampff und Trucano beschäftigen sich ebenfalls mit dem Zusammenhang von Validierungs- und Anwen-dungsbereich in Bezug auf das Modellvertrauen. Hierauf wird im Kapitel 5.11 näher eingegangen.

⁷¹ Vgl. Balci: Quality assessment, verification, and validation of modeling and simulation applications, 2004, S. 123.

⁷² Balci: Quality assessment, verification, and validation of modeling and simulation applications, 2004, S. 123 ff.

⁷³ Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 53.

⁷⁴ Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 53.

⁷⁵ Vgl. Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 53 ff.

⁷⁶ Vgl. Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 56.

Als einfaches Rahmenwerk für den Verifikations- und Validierungsprozess schlägt Carson im Vergleich zu Balci ein deutlich weniger komplexes dreistufiges Vorgehen vor. Demnach erfolgt zunächst eine Augenscheinvalidierung (siehe Kapitel 6.2.2) des Modells. Er nennt hierfür keine anzuwendenden Techniken, sondern fordert lediglich, dass die Modellausgangsgrößen für einen definierten Anwendungsfall zu untersuchen sind und dabei die Frage, ob das Modell angemessen ist, subjektiv zu beantworten ist. Im zweiten Schritt soll nach Carson das Modell in Form eines Stresstests für einen Wertebereich von Eingangsgrößen untersucht werden. Die Änderungen der Ausgangsgrößen werden hinsichtlich ihres Trends, ihres qualitativen Verhaltens und hinsichtlich der zu erwartenden Änderungen bewertet. Dies stellt erstmalig einen Prozess dar, der die Validität für einen Datensatzbereich und nicht nur für einen singulären Datensatz untersucht. Erst im dritten Schritt, werden die Modellausgangsgrößen mit den Erkenntnissen aus realen Systemen verglichen, wobei auch hier wissenschaftliche Annahmen für zukünftige Systeme als Referenz zulässig sind.⁷⁷

5.10 Vier-Stufen-Prozess nach Logan, Nitta und Chidester (2002-2006)

Logan et al.⁷⁸ haben am *Lawrence Livermore National Laboratory (University of California)* zu den Themen Validierung und Vertrauensnachweis geforscht und beleuchten insbesondere die Validierung in Zusammenhang mit der Quantifizierung von Unsicherheiten. Für die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells eines physikalischen Systems beschreiben sie einen vierstufigen Prozess bestehend aus (1) der Planungs- und Anforderungsphase, (2) der Lösungsverifikation (Solution Verification), (3) der Modellvalidierung und (4) der Extrapolation von der Datendomäne in die Anwendungsdomäne.⁷⁹

Es handelt sich somit um einen weiteren an den Modellbildungsprozess angelehnten, allgemeinen V&V-Prozess. Das von Logan et al. entwickelte qualitative Validitätsmaß wird in Kapitel 6.4.2 beschrieben.

5.11 Drei-Stufen-Prozess und Richtlinien nach Oberkamp und Trucano (2002-2008)

Oberkamp und Trucano haben als Mitglieder des technischen Personals der *Sandia National Laboratories* speziell auf dem Gebiet der Modellvalidierung geforscht. In einem gemeinsamen Paper aus

⁷⁷ Vgl. Carson: Model Verification and Validation, 2002, S. 56 ff.

⁷⁸ Vgl. Logan, Nitta: Verification & Validation (V&V) Methodology and Quantitative Reliability at Confidence (QRC): Basis for an Investment Strategy, 2002.

Vgl. Logan, Nitta: Validation, Uncertainty, and Quantitative Reliability at Confidence (QRC), 2003.

Vgl. Logan, Nitta: Verification & Validation: Process and Levels Leading to Qualitative or Quantitative Validation Statements, 2003.

Vgl. Logan, Nitta: Solution Verification Linked to Model Validation, Reliability, and Confidence, 2004.

Vgl. Logan, Nitta, Chidester: Risk Reduction as the Product of Model Assessed Reliability, Confidence, and Consequence, 2005.

Vgl. Logan, Nitta, Chidester: Estimating Parametric, Model Form, and Solution Contributions Using Integral Validation Uncertainty Quantification, 2006.

Vgl. Logan, Nitta: Comparing 10 Methods for Solution Verification, and Linking to Model Validation, 2006.

⁷⁹ Vgl. Logan, Nitta: Solution Verification Linked to Model Validation, Reliability, and Confidence, 2004, S. 1 f.

dem Jahr 2008 gehen sie auf den Stand der Wissenschaft im Bereich der Modellverifikation und -validierung (V&V) ein. Sie beschreiben, dass in den vergangenen Jahren bezüglich beider Prozesse Benchmarks in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen entwickelt wurden, aber kein allgemeiner Anwendungsleitfaden für V&V-Benchmarks bestehe. Diese Erkenntnis ist in Übereinstimmung mit den Zusammenfassungen der vorherigen Kapitel 5.1 bis 5.9. Die Autoren stellen Empfehlungen für die effektive Gestaltung und Nutzung von Verifikationsmethoden und Validierungsmethoden vor. Bezüglich der Verifikation gehen sie detailliert auf die Gestaltung von Experimenten, die Bestimmung von Messungenauigkeiten für Ein- und Ausgangsgrößen, die anzuwendenden Validierungsmetriken und die Bedeutung der Modellkalibrierung ein. Sie vertreten die Ansicht, dass die prädiktiven Fähigkeiten eines Modells von den Ergebnissen des V&V-Prozesses abhängen.⁸⁰

Im Validierungsprozess sind nach Oberkampff und Trucano drei Kernaspekte zu untersuchen. Diese sind (1) die Bewertung der Modellgenauigkeit durch Vergleich mit Versuchsdaten, (2) die Interpolation und die Extrapolation des Modells für den vorgesehenen Einsatzbereich und (3) die Entscheidung über die Modelleignung für den vorgesehenen Einsatzbereich.⁸¹

Für die Validitätsbeurteilung ist folgende Ausführung von Oberkampff und Trucano von besonderer Wichtigkeit:

“[...] [E]xperimental measurements are the most faithful reflections of reality for the purpose of validation. Validation requires that the estimation process for error and uncertainty must occur on both sides of the coin: mathematical physics and experiment.”^{82,83}

Hieraus geht hervor, dass für die Modellvalidierung die Genauigkeit der Messung, welche als reale Referenz herangezogen wird, quantifiziert werden muss. An das Modell kann und darf nicht die Anforderung gestellt werden, genauere Ergebnisse zu liefern als der Streubereich der Messung vorgibt. Dieser Sachverhalt ist unmittelbar mit statistischen Auswertemethoden verknüpft, auf die in Kapitel 6.3.11 näher eingegangen wird. Sie zeigt zudem, dass eine erhöhte Sicherheit bzw. Modellgenauigkeit nur durch eine Erhöhung der Anzahl von Versuchen oder der Genauigkeit der Messung nachgewiesen werden kann. Der Zusammenhang von Validierungsaufwand und Nachweis der Repräsentationsgenauigkeit eines Modells wird in Kapitel 4 beschrieben.

Für die Gestaltung der Validierungsexperimente nennen Oberkampff und Trucano sechs Richtlinien. Die wesentlichen Aussagen der Richtlinien sind:⁸⁴

1. Die Experimente sollen von Personen aus dem Versuch, Modellentwicklern, Programmierern und Modellnutzern gemeinsam gestaltet werden.

⁸⁰ Vgl. Oberkampff, Trucano: Verification and validation benchmarks, 2008, S. 717.

⁸¹ Vgl. Oberkampff, Trucano: Verification and validation benchmarks, 2008, S. 725.

⁸² Oberkampff, Trucano: Verification and validation in computational fluid dynamics, 2002, S. 218.

⁸³ Sinngemäße Übersetzung des Zitats:

Experimentelle Messungen sind die vertrauenswürdigsten Repräsentationen der Realität für den Zweck der Validierung. Die Validierung erfordert, dass ein Prozess zur Abschätzung von Fehlern und Ungenauigkeiten sowohl auf der Seite der mathematischen Physik als auch auf der Seite der Experimente erfolgen muss.

⁸⁴ Vgl. Oberkampff, Trucano: Verification and validation benchmarks, 2008, S. 726.

-
2. Das Experiment soll so gestaltet sein, dass es die essentiellen physikalischen Eigenschaften erfasst.
 3. Das Experiment soll die Synergien zwischen rechnergestütztem und experimentellem Vorgehen hervorheben.
 4. Die simulierten und die gemessenen Ergebnisse sollen unabhängig voneinander erhoben werden.
 5. Eine Hierarchie der experimentellen Messungen von steigendem Komplexitätsanspruch des Rechnermodells soll erstellt werden.
 6. Die Experimente sollen so gestaltet sein, dass die Anteile von zufälligen und systematischen Fehlern erfasst und analysiert werden können.

Von großem Einfluss für das erreichbare Modellvertrauen ist die Beziehung zwischen Validierungsbereich und Einsatzbereich. Oberkampff et al. unterscheiden hierzu die drei Fälle (a) vollständige Übereinstimmung, (b) teilweise Übereinstimmung und (c) keine Übereinstimmung, die sie in ihrer Veröffentlichung auch visualisieren.⁸⁵

In Fall (a) liegt der Anwendungsbereich vollständig im Validierungsbereich, sodass hier durch quantitative Nachweise das größtmögliche Modellvertrauen hergestellt werden kann. Theoretisch können – wenn es der Aufwand erlaubt – alle Anwendungsszenarien der Simulation mit Versuchsdaten verglichen werden. In Fall (b), bei dem es zu einer Teilüberschneidung beider Bereiche kommt, kann zumindest für einen Teilbereich quantitativ belegt werden, dass das Modell und das reale System in Übereinstimmung sind, was generell zu einem zufriedenstellenden Modellvertrauen führt. Anders verhält es sich in Fall (c), bei dem das Modell in einem anderen Bereich validiert wird, als demjenigen, in dem es Anwendung findet. Da kein quantitativer Übereinstimmungsnachweis erbracht werden kann, muss dem Modell die Fähigkeit richtiger Vorhersagen – auch als *Prädiktionsfähigkeit*⁸⁶ bezeichnet – nachgewiesen werden, was schwierig ist und generell zu einem geringeren Vertrauenslevel führt.⁸⁷

5.12 Fünf Prinzipien nach Refsgaard und Henriksen (2004)

Refsgaard und Henriksen beschäftigen sich mit hydrologischen Simulationsanwendungen und beschreiben Modellierungsrichtlinien, die auch in anderen Forschungsgebieten anwendbar sind.⁸⁸ Diese basieren im Kern auf fünf Prinzipien:⁸⁹

⁸⁵ Vgl. Oberkampff, Trucano, Hirsch: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics, 2004, S. 351.

⁸⁶ Vgl. Kapitel 6.3.6.

⁸⁷ Vgl. Oberkampff, Trucano, Hirsch: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics, 2004, S. 351 f.

⁸⁸ Vgl. Refsgaard, Henriksen: Modelling guidelines - terminology and guiding principles, 2004, S. 71.

⁸⁹ Vgl. Refsgaard, Henriksen: Modelling guidelines - terminology and guiding principles, 2004, S. 79 f.

-
1. Die verwendete Terminologie, die sich an den wissenschaftlich etablierten Definitionen ausrichtet (vgl. Kapitel 3), muss intern konsistent sein.
 2. Validierung und Verifikation sind an klar definierten Anwendungsbereichen auszurichten und nicht universell durchführbar.
 3. Für Validierungstests müssen unabhängige Vergleichsdaten verwendet werden, die nicht zuvor für die Kalibrierung des Modells verwendet wurden. Dies ermöglicht die Bewertung der Fähigkeit von Vorhersagen durch das Modell, was essentiell für die Validierung der von Oberkamp et al. beschriebene Konstellation (c) in Kapitel 5.11 ist.
 4. Modellbasierte Vorhersagen sollten mit Unsicherheiten verknüpft werden, die aus der Modellstruktur und den Modellparametern abgeleitet werden.
 5. Eine kontinuierliche Abstimmung zwischen Entscheidungsträger bzw. Manager und Modellentwickler ist entscheidend für den Erfolg einer Simulationsstudie.

5.13 Iterativer Acht-Stufen-Prozess nach Sargent (2000-2014)

Sargent verfolgt einen iterativen Modellentwicklungsprozess.⁹⁰ Er ist eine direkte Ableitung aus dem Modellbildungsprozess, wie er in Kapitel 3 beschrieben ist.

Sargent beschreibt in seinen Veröffentlichungen drei grundlegende Herangehensweisen für die Validierung. Er unterscheidet zwischen der Validitätsbeurteilung durch (1) die Modellentwickler, (2) die Modellnutzer und durch (3) eine dritte unabhängige Instanz während bzw. nach dem Modellentwicklungsprozess. Die dritte Variante wird auch als *independent verification and validation (IV&V)* bezeichnet.⁹¹ Als Mindestprozess für die Validierung definiert Sargent das folgende acht-stufige Vorgehen:⁹²

1. Treffen von Vereinbarungen für die Modellentwicklung zwischen Entwicklungsteam und Sponsoren sowie Spezifikation der Validierungstechniken.
2. Spezifikation der erforderlichen Modellgenauigkeit.
3. Test der getroffenen Annahmen und Theorien.
4. In jeder Modelliteration zumindest Durchführung einer Augenscheinvalidierung (siehe Kapitel 6.2.2) für das konzeptionelle Modell.

⁹⁰ Entsprechende Abbildung siehe Sargent: *Verifying and Validating Simulation Models*, 2014, S. 122.

⁹¹ Vgl. Sargent: *Verifying and Validating Simulation Models*, 2014, S. 119.

Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2009, S. 163.

Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2005, S. 131.

Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2003, S. 38.

Vgl. Sargent: *Some Approaches and Paradigms for Verifying and Validating Simulation Models*, 2001, S. 107.

Vgl. Sargent: *Verification, validation, and accreditation of simulation models*, 2000, S. 51.

⁹² Vgl. Sargent: *Verification and validation of simulation models*, 2009, S. 172 f.

-
5. In jeder Modelliteration Untersuchung des Modellverhaltens des Simulationsmodells.
 6. Mindestens in der letzten Iteration Vergleich von Modell- und realem Systemverhalten.
 7. Dokumentation.
 8. Erstellung eines Zeitplans für die periodische Überprüfung.

An die Modellentwickler stellt Sargent die Forderung, dass das Modell für einen spezifischen Anwendungszweck erstellt und so einfach wie möglich sein solle. Ein Modell solle nicht mehr können, als von ihm per Anforderungsdefinition verlangt wird.⁹³

Sargent erläutert weiterhin in Übereinstimmung mit den Ausführungen von Balci (siehe Kapitel 5.8), dass die Datenvalidierung ein notwendiger aber auch aufwändiger, komplizierter und insbesondere kostspieliger Prozess sei. Die Modellvalidierung müsse immer mit einer Datenvalidierung verknüpft sein. Die Praxis zeige, dass in nicht systematisch durchgeführten Validierungsstudien Datenungenauigkeit sehr häufig der Grund für eine Modellinvalidität ist. Daten werden für die Erstellung des konzeptionellen Modells, für die Modellvalidierung und für die Durchführung von Experimenten mit dem validierten Modell benötigt, sodass invalide Eingangsdaten im Modellierungsprozess an drei Stellen zu Fehlern führen. Sargent gibt jedoch zu, dass es sehr schwierig sei, den Eingangsdaten und Parametern des Modells ihre Korrektheit nachzuweisen.⁹⁴ Die Anwendung graphischer Modelle trägt nach Sargent zu einer Verbesserung des konzeptionellen Validierungsprozesses bei, weil der Modelaufbau z.B. in funktionalen Ebenen erfolgen kann.⁹⁵

5.14 V-Modell-basierter Prozess nach Kutluay (2013)

Kutluay entwickelte für seine Dissertation eine Validierungsmethode für Simulationsmodelle in der Fahrdynamik. Der Prozessstruktur liegt das V-Modell zugrunde. Wesentlich ist die Anforderungsdefinition für die eine Dekonstruktion und Analyse des realen Systems vorgenommen wird.⁹⁶

Der Prozess basiert auf einer Analyse des Stands der Technik und berücksichtigt auch die in Kapitel 2 beschriebenen wissenschaftsphilosophischen Grundlagen. Kutluay demonstriert die Methodik anhand von drei standardisierten Fahrmanövern.⁹⁷ Hierauf wird in Kapitel 7.9 näher eingegangen. Kutluays beiden grundlegenden Erkenntnisse sind:⁹⁸

- Ziel des Modells ist die Vorhersage des Fahrverhaltens in realen Manövern. Diese Fähigkeit ist durch die Modellvalidierung zu überprüfen.

⁹³ Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 121.

⁹⁴ Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 121 f.

⁹⁵ Vgl. Sargent: The use of graphical models in model validation, 1986.

⁹⁶ Vgl. Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013, S. 40.

⁹⁷ Vgl. Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013.

⁹⁸ Vgl. Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013, S. 40 f.

-
- Testmanöver sind für die Fahrdynamikvalidierung unerlässlich, da diese wiederholbar sind und Vergleichbarkeit gewährleisten, was bei Fahrten im öffentlichen Verkehr nicht der Fall ist. Es muss sichergestellt werden, dass die Testmanöver für die Anforderungen repräsentativ sind.

5.15 Validierungsprozess für die Praxis nach Klemmer et al. (2013)

Im Vergleich zu vielen der vorherigen Prozessdefinitionen legen Klemmer et al. besonderen Wert auf die Praktikabilität des Prozesses bei gleichzeitiger Fokussierung des Qualitätsnachweises für das betrachtete Modell. Dies äußert sich in der weniger komplexen Prozessstruktur⁹⁹, die zunächst ein nach definierten Kriterien verifiziertes Modell anstrebt und dieses anschließend validiert. Der Gesamtprozess baut auf dem bisherigen Forschungsstand auf und reduziert die Teilprozesse auf ein notwendiges Minimum, um praktische Anwendbarkeit zu gewährleisten.

Nach Klemmer et al. ist ein Modell entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3 einem Verifikations- und einem Validierungsprozess zu unterziehen. Der Verifikationsprozess unterteilt sich in die *Verifikationstests* (*Verification Checks*) und die *Modelländerungen* (*Model Adaptions*). In den Verifikationstests müssen die Kriterien Ausführbarkeit, Stabilität, Anforderungserfüllung, Robustheit im relevanten Anwendungsbereich, dynamisches Verhalten, Eignung des numerischen Solvers und die Erfüllung der Massen- und Energieerhaltung physikalischer Modelle untersucht werden. Wird mindestens eines dieser Kriterien nicht erfüllt, müssen Modelländerungen vorgenommen werden. Anschließend folgt die Datenvalidierung, die sich aus dem *Datenvergleich* (*Data Comparison*) und den *Modelladaptionen* (*Model Adaptions*) zusammensetzt. Im Datenvergleich wird geprüft, wie die Ausgangsdaten der Simulation mit Vergleichsdaten des abzubildenden Systems für bestimmte Lastfälle übereinstimmen. Ein Lastfall setzt sich zusammen aus den Eingangsdatensätzen, den Umgebungsvariablen und den Betriebszuständen. Wenn die geforderte Übereinstimmungsgenauigkeit nicht erfüllt wird, erfolgen Modelladaptionen. Hierfür ist die Identifikation der Gründe für die Abweichungen essentiell. Diese können vielfältig sein, z.B. Programmierungsfehler, Dateninvalidität oder falsche Annahmen. Werden Änderungen am konzeptionellen Modell vorgenommen, muss der Verifikationsprozess wiederholt werden.¹⁰⁰ Die Autoren führen ein metrisches Qualitätsmaß ein, auf das in Kapitel 6.4.3 näher eingegangen wird.

5.16 Zusammenfassung der Validierungsprozesse (1980-2016)

Die in den Kapiteln 5.1 bis 5.15 aufgezeigten Prozessdefinitionen und Vorgehensweisen zeigen, wie vielfältig und wie unterschiedlich die Sichtweisen und vorgeschlagenen Prozesse für die Modellentwicklung und insbesondere für die Modellvalidierung sind. Die Forscher auf diesem Gebiet legen unterschiedliche Schwerpunkte. Diese sind die Komplexität und Praktikabilität des Prozesses, die

⁹⁹ Entsprechende Abbildung siehe: Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 746.

¹⁰⁰ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 745 f.

Prozessstruktur und der Erkenntnisgewinn, der Vertrauens- und Qualitätsnachweis, die Modellanwendungen und die Modelloptimierung. Dennoch besteht ein gemeinsames Verständnis, dass nur ein systematisches Vorgehen, welches das Modell hinsichtlich unterschiedlicher Eigenschaften kritisch hinterfragt, zu einem Nachweis von Glaubwürdigkeit und damit zu einem gesteigerten Vertrauen in die Simulationsergebnisse führt. Die zeitliche Entwicklung, über die die vorherigen Kapitel Aufschluss geben, zeigen zudem, dass die frühen Veröffentlichungen zunächst die Validierung des Modells in den Prozessbeschreibungen und Prozessanforderungen adressierten. In den 90er Jahren wuchs dann die Bedeutung der Modellvalidität, sodass auch der Nutzen valider Modelle in den Prozessentwicklungen berücksichtigt wurde, was sich in den Ausführungen zur praktischen Prozessgestaltung widerspiegelt. In den jüngsten Veröffentlichungen stehen zunehmend die Systematisierung und Objektivierbarkeit von Entscheidungen im Vordergrund.

Die vorgestellten Literaturquellen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und geben keinesfalls den gesamten Stand der Wissenschaft wieder. Sie zeigen jedoch einen Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse der Modellvalidierung. Diverse Teilprozesse der Verifikation und Validierung sind eng miteinander verbunden. Diese Zusammenhänge werden ebenfalls erforscht. So untersuchen beispielsweise Hills und Dowding, wie sich Approximation, Kalibrierung, Extrapolation und Modellvalidierung gegenseitig beeinflussen.¹⁰¹ Auch wenn bis heute keine allgemeingültige Vorgehensmethodik definiert wurde,¹⁰² bieten – zusätzlich zu der Vielzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen – Richtlinien, wie z.B. die VDI 2206¹⁰³, methodische Grundlagen, die einen systematischen Simulationsprozess unterstützen.

Die unterschiedlichen Sichtweisen werden auch in einem gemeinsamen Paper von Sargent, Glasnow, Kleijnen, Law, McGregor und Youngblood verdeutlicht. Bei ihnen handelt es sich um sechs Simulationsexperten – zwei akademische Forscher, zwei Entwickler für industrielle Simulationsmodelle und zwei Experten für die Bewertung von militärischen Simulationsmodellen. Aus ihren Darstellungen geht hervor, dass der Anwendungsbereich des Modells starken Einfluss auf die Prozesse Verifikation, Validierung und Akkreditierung hat.¹⁰⁴

¹⁰¹ Vgl. Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005.

¹⁰² Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 743.

¹⁰³ VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, 2004.

¹⁰⁴ Vgl. Sargent, Glasow, Kleijnen, Law, McGregor, Youngblood: Strategic directions in verification, validation, and accreditation research, 2000, S. 909.

6 Validierungstechniken

Da die konzeptionelle Modellvalidierung domänenspezifische Kenntnisse des Modellentwicklers voraussetzt und sich ausschließlich auf das konzeptionelle – also theoretische und nicht zeitlich ausführbare – Modell bezieht, wird im Folgenden die operative Modellvalidierung, für die adaptierbare und universelle Techniken entwickelt wurden, näher beleuchtet. Die operative Validierung ist wissenschaftlich und industriell von Bedeutung, da sie das Simulationsmodell, das alternativ zum realen Versuchsobjekt zur Erzeugung von Ergebnissen und zum Ableiten von Erkenntnissen herangezogen wird, adressiert (siehe Kapitel 3). Für die operative Modellvalidierung besteht eine Vielzahl von Techniken, die keine Kenntnisse über das konzeptionelle Modell voraussetzen, sondern eine direkte Untersuchung des ausführbaren Simulationsmodells ermöglichen. In Kapitel 6.1 wird anhand von Taxonomien aus der Literatur ein Überblick über die Vielzahl von Techniken gegeben. Die in der Praxis bedeutendsten subjektiven und objektivierbaren Validierungstechniken werden darauffolgend in den Kapiteln 6.2 und 6.3 detailliert beschrieben. Kapitel 6.4 ergänzt die beiden zuvor behandelten Bereiche *Validierungsprozesse* und *Validierungstechniken* um den letzten wichtigen Aspekt, nämlich die Maße für Modellvalidität. Im Anschluss vermittelt Kapitel 7 einen Überblick über Validierungsstudien in der Fahrdynamik, sodass ersichtlich wird, welche Techniken in welcher Form bis heute angewendet wurden.

6.1 Überblick und Klassifizierung

Operative Validierungstechniken stellen Verfahren zur Validierung des Simulations- bzw. Computermodells (vgl. Kapitel 3) dar. Eine operative Validierungsmethode umfasst die Definition der Validierungsmetrik und der metrischen Validitätskriterien. Zu der Validierungsmetrik gehören – abgeleitet aus dem heutigen Stand der Wissenschaft – folgende Festlegungen, die insbesondere das methodische Vorgehen und die Entscheidungsgrundlagen betreffen:

- Testanwendungen: Welche Versuche bzw. Experimente werden für den Vergleich von Simulationsmodell und realem System herangezogen?
- Konfigurationen: Welche Kombinationen aus Datensatz, Modellstruktur und Testanwendung werden bei der Validierung betrachtet?
- Validierungstechniken: Wie werden Mess- und Simulationsdaten miteinander verglichen?
- Validitätsmaß: Welches Bewertungsmaß wird für die Validitätsbeurteilung herangezogen?

Jede operative Validierungstechnik definiert zumindest Teile einer Validierungsmethode. Unter Validitätskriterien werden die anwendungsbezogenen Größen verstanden, die im Validierungsprozess betrachtet werden. Bezogen auf das reale System werden für objektive Bewertungsverfahren basierend hierauf die erforderlichen Messgrößen definiert. Objektivität erfordert, dass die Bewertung anhand von Genauigkeitsanforderungen erfolgt.

Die umfassendste Übersicht und Klassifizierung von Verifikations- und Validierungstechniken (V&V-Techniken) stammt von Balci.¹⁰⁵ Dabei unterscheidet er zunächst hinsichtlich 77 grundsätzlich anwendbaren V&V-Techniken¹⁰⁶ und 38 zusätzlichen V&V-Techniken für objektorientierte Simulationsmodelle¹⁰⁷. Die vollständigen Taxonomien können den referenzierten Quellen entnommen werden. Die meisten der aufgeführten Techniken stammen aus der Softwareentwicklung.¹⁰⁸ Eine detaillierte Beschreibung aller Techniken erfolgt im *Handbook of Simulation*¹⁰⁹, zu dem Balci das Kapitel mit dem Titel *Verification, Validation, and Testing* beigetragen hat. Die Validierungstechniken für konventionelle Modelle können in vier Kategorien gruppiert werden: (1) informelle, (2) statische, (3) dynamische und (4) formale Techniken.¹¹⁰

Informelle V&V-Techniken basieren auf Argumentationen und subjektiven Entscheidungen ohne jegliche mathematische Formalisierung. Sie sind die derzeit am häufigsten angewendeten Verfahren. Dies ist nicht darin begründet, dass sie besonders glaubwürdig sind, sondern darin, dass sie schnell, mit wenig Aufwand und kostengünstig umzusetzen sind. Mathematische Entscheidungsgrundlagen gibt es nicht. Die Definition gibt das grundlegende Vorgehen vor, aber keine objektiven Validitäts- und Bewertungskriterien. Statische Techniken erfordern keine Ausführung des Modells. Damit steht bei diesen Verfahren die Verifikation des Modells im Vordergrund. Der Simulationscompiler selbst ist z.B. ein statisches V&V-Tool. Dynamische Techniken erfordern die Modellausführung und bewerten das Modell anhand dessen Verhaltens während der Ausführung. Diese Techniken eignen sich besonders für die konzeptionelle Modellvalidierung. Die formalen Techniken umfassen wiederum Verifikationstechniken, die die mathematische Prüfung des Modells durchführen.¹¹¹

Auf objektorientierte Simulationsmodelle können zusätzlich zu den konventionellen Techniken auch adaptive und spezifische V&V-Techniken angewendet werden. Adaptive Techniken erfordern – wie der Name schon sagt – eine Adaption oder Erweiterung auf das spezielle Objekt. Spezifische Techniken sind Verfahren, die auf das Modell ausgerichtet sind.¹¹²

In seiner Veröffentlichung *Verification, Validation, and Accreditation* stellt Balci dar, wo im Modellentwicklungsprozess welche V&V-Technik anwendbar ist.¹¹³

¹⁰⁵ Vgl. Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 138 ff.

Vgl. Balci: *Verification, Validation, and Accreditation*, 1998, S. 45 ff.

Vgl. Balci: *Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification, and Testing*, 1995, S. 151 ff.

Vgl. Balci: *Guidelines for Successful Simulation Studies*, 1990, S. 30 f.

Vgl. Balci: *Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications*, 2003, S. 155 f.

¹⁰⁶ Entsprechende Abbildung siehe Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 139.

¹⁰⁷ Entsprechende Abbildung siehe Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 140.

¹⁰⁸ Vgl. Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 138.

¹⁰⁹ Balci: *Verification, Validation and Testing*. In Banks: *Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 1998.

¹¹⁰ Vgl. Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 139.

¹¹¹ Vgl. Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 138.

¹¹² Vgl. Balci: *Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models*, 1997, S. 138.

¹¹³ Vgl. Balci: *Verification, Validation, and Accreditation*, 1998, S. 45 ff.

Balcis Übersicht verdeutlicht die Vielfalt der unterschiedlichen Techniken. Er selbst – aber auch andere Forscher – nennen weitere Techniken, die nicht explizit in seinen Taxonomien aufgeführt sind, aber im Regelfall einer der 77 Techniken zuzuordnen sind. Die informellen und die dynamischen V&V-Techniken sind für die operative Modellvalidierung geeignet. Auf die wichtigsten Techniken innerhalb dieser beiden Kategorien wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen.

Eine Charakterisierung der Technik-Klassen (informelle, statische, dynamische, symbolische, beschränkte und formale Analyse) nach Kategoriedefinition, Formalisierungslevel, Komplexität, Inanspruchnahme menschlicher Ressourcen, Kosten für IT-Ressourcen, Effektivität, Erfordernis von Messtechnik sowie Bedeutung für die Modellverifikation und Modellvalidierung kann der gemeinsamen Veröffentlichung von Whitner und Balci entnommen werden.¹¹⁴ Es ist zu berücksichtigen, dass darin sowohl Verifikations- als auch Validierungsstrategien klassifiziert sind.¹¹⁵ Aber auch die Validierungstechniken sind untereinander nicht einfach austauschbar, da sie unterschiedliche Eingangs- und Ausgangsinformationen aufweisen und damit verschiedene Schnittstellen besitzen. Bedingt hierdurch ist auch die Kombination unterschiedlicher Techniken miteinander möglich.

Davis wählt im Gegensatz zu Balci eine Taxonomie, die die drei Klassen (1) empirische Bewertung, (2) theoretische Bewertung und (3) Bewertung durch andere Vergleiche umfasst.¹¹⁶ Eine weitere Möglichkeit, operative Validierungstechniken zu gruppieren, ist die Einordnung in subjektive und objektive bzw. statistische Validierungstechniken.¹¹⁷ Balcis informelle und dynamische V&V-Techniken können jeweils einer dieser beiden Gruppen zugeordnet werden. Eine entsprechende Einordnung der V&V-Techniken wird von Rabe et al. durchgeführt.¹¹⁸

6.2 Subjektive Validierungstechniken

Nachfolgend werden vollständig subjektive Validierungstechniken vorgestellt. Die Subjektivität betrifft insbesondere den Bewertungsmaßstab, nach dem beurteilt wird, ob das Modell als glaubwürdig bzw. valide deklariert wird oder nicht.

6.2.1 Selbstprüfung

Bei der *Selbstprüfung* (*desk checking*) handelt es sich um die Selbstkontrolle des Modellentwicklers, in der er überprüft, ob er selbst korrekt, vollständig, konsistent und unvoreingenommen arbeitet. Über

¹¹⁴ Entsprechende Abbildung siehe Whitner, Balci: Guidelines for Selecting and Using Simulation Model Verification Techniques, 1989, S. 560.

¹¹⁵ Vgl. Whitner, Balci: Guidelines for Selecting and Using Simulation Model Verification Techniques, 1989, S. 559 ff.

¹¹⁶ Vgl. Davis: Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) for Military Simulations, 1992, S. 15 ff.

¹¹⁷ Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 30 f.

Vgl. Balci: How to Assess the Acceptability and Credibility of Simulation Results, 1989, S. 62.

¹¹⁸ Entsprechende Abbildung siehe Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 116.

den Bezug zum Modell macht diese Technik keine Aussage und es ist fragwürdig, ob ein derartiger Prozess effektiv zu einer Modellverbesserung im Hinblick auf die Validität beitragen kann.¹¹⁹

6.2.2 Augenscheinvalidierung

Die *Augenscheinvalidierung* (*face validation*) ist die subjektivste aller Validierungstechniken. Per Definition entscheiden Mitglieder des Projektteams, Modellnutzer oder Systemexperten anhand eines Vergleichs von Modell- und Systemverhalten subjektiv und erfahrungsbasiert über die Validität des Modells. Durch den Dialog von Fachexperten sollen Modelle neu durchdacht und dadurch Modellfehler aufgedeckt werden. Die Vergleichsmethode sowie der Bewertungsmaßstab werden nicht vorgegeben.¹²⁰

6.2.3 Visualisierung, Animation

Die *Visualisierung* bzw. *Animation* (*visualization / animation*) ist eine bezüglich des Vorgehens näher spezifizierte Augenscheinvalidierung. Der Entwickler erhält anhand graphischer Ausgaben, die nicht weiter definiert sind, Informationen über das operative Verhalten des Modells und kann diese mit Beobachtungen aus dem realen System bildlich vergleichen. Mittels dieser Technik lassen sich je nach Anwendungsfall grobe Modellfehler sehr schnell identifizieren.¹²¹ Die Animation birgt das Risiko, das System nicht lange genug zu analysieren, sodass selten auftretende Modellfehler ggf. nicht identifiziert werden und dass die Simulation in einer Geschwindigkeit erfolgt, in der der Beobachter mögliche Modellfehler nicht identifizieren kann.¹²²

¹¹⁹ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 28.

¹²⁰ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing: In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 28.

Vgl. Tsang: A broad view of model validation, 1989, S. 5.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 30.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 109.

Vgl. Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models, 1984, S. 119.

Vgl. Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, 1985, S. 18.

Vgl. Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models, 2000, S. 55.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 166.

Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 125 f.

¹²¹ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 56 f.

¹²² Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 95 f.

Vgl. Kleijnen: Verification and validation of simulation models, 1995, S. 150 f.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 166.

6.2.4 Graphischer Vergleich

Der *graphische Vergleich* (*graphical comparison*) ist ebenfalls eine Form der Augenscheinvalidierung. Simulierte und gemessene Zeitverläufe von subjektiv definierten Kenngrößen werden miteinander verglichen und ebenfalls subjektiv hinsichtlich der Übereinstimmungsgenauigkeit beurteilt. Untersucht werden die Graphen z.B. in Bezug auf Periodizität, Symmetrie, Steigung, Lage und Höhe von Extrema.¹²³ Fehlerdiagramme, die die Differenz des Messsignals und des Simulationsergebnisses über der Zeit darstellen, können zu einer besseren Identifikation von Übereinstimmungsgenauigkeiten und damit Modellfehlern beitragen.¹²⁴ Sargent beschreibt subjektive Validierungsmethoden, die auf der Nutzung graphischer Datendarstellungen beruhen. Zu den beschriebenen Techniken gehören Histogramme, Kastenplots und Verhaltensgraphen.¹²⁵

6.2.5 Turing-Test

Beim *Turing-Test* handelt es sich um eine besondere Variante des graphischen Vergleichs. Ein Experte bekommt einen Messschrieb und eine äquivalente Auswertung aus der Simulation. Wenn er richtig zuordnen kann, welches Diagramm aus der Simulation und welches aus dem Versuch stammt, gilt das Modell als nicht valide. Der Experte muss erklären, woran er den Unterschied erkannt hat, sodass eine gewisse Lokalisierung des Modellfehlers möglich ist. Wenn der Experte die Diagramme als gleichwertig beurteilt, steigt das Modellvertrauen.¹²⁶ Eine falsche Zuordnung würde aufzeigen, dass der Experte nicht über das nötige Systemverständnis verfügt.

¹²³ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 44.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 30.

¹²⁴ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 8 f.

Vgl. Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models, 1984, S. 119.

Vgl. Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, 1985, S. 18.

Vgl. Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models, 2000, S. 55.

Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 125 f.

¹²⁵ Vgl. Sargent: Some Approaches and Paradigms for Verifying and Validating Simulation Models, 2001.

Vgl. Sargent: Some subjective validation methods using graphical displays of data, 1996.

¹²⁶ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 30.

Vgl. Tsang: A broad view of model validation, 1989, S. 6.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 31.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 107 f.

Vgl. Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models, 1984, S. 119.

Vgl. Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, 1985, S. 18.

Vgl. Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models, 2000, S. 55.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 167.

Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 125 f.

6.3 Objektivierbare Validierungstechniken

Die nachfolgend vorgestellten Validierungstechniken werden als *objektivierbar* und nicht als *objektiv* klassifiziert, weil die Beschreibungen der Techniken selbst kein vollständig objektives Vorgehen verlangen – z.B. im Hinblick auf die Auswahl der Metrik und der Validitätskriterien sowie des Bewertungsmaßstabes. Außerdem geht aus den Techniken nicht hervor, mit welchem Maß Modellvalidität objektiv angegeben werden kann. Ein Ansatz für die Angabe eines Akkreditierungslevels eines Modells wird von Gass beschrieben.¹²⁷ Die folgenden Techniken stellen aber Methoden dar, die einen objektiven Vergleich metrischer Validitätskriterien zulassen und damit gegenüber den Techniken aus Kapitel 6.2 einen objektiven Bewertungsmaßstab aufweisen oder zumindest ermöglichen.

6.3.1 Vergleichstest

Der *Vergleichstest* (*Comparison Testing*) kommt zum Einsatz, wenn zwei Modelle das gleiche System in der gleichen Anwendung abbilden sollen. In diesem Fall werden beide Modelle mit den gleichen Eingangsdaten ausgeführt. Zum Bestehen des Tests müssen die Ausgangsdaten der Modelle gleich sein.¹²⁸ Dieser Validierungstest wird beispielsweise dann herangezogen, wenn die Simulationssoftware gewechselt wird (bzw. ein Update erfährt) und für die Weiterentwicklung des Modells in der neuen Software zunächst die Übereinstimmung des Modellverhaltens mit demjenigen in der alten Software nachgewiesen werden soll. In diesem Fall wird das alte Modell als valide Modellreferenz betrachtet. Diese Technik bietet den Vorteil des hohen Automatisierungsgrades und der dadurch umfassenden sowie kostengünstigen Prüfung auf Übereinstimmung beider Modelle, da keine Messdaten aus dem realen System erhoben und verarbeitet werden müssen.

Unter *Vergleichstest* ist auch der Vergleich von Ausgangsdaten der Simulation und Messergebnissen des realen Systems zu verstehen, der über den subjektiven graphischen Vergleich von Diagrammen hinausgeht (siehe Kapitel 6.2.4). Murray-Smith stellt mathematische Ansätze vor, um zeitbezogene Signale quantitativ miteinander zu vergleichen. Hierzu gehören die *Summe der Fehlerquadrate*, die Erweiterung zu einer *Kostenfunktion* und *Theils Ungleichheitskoeffizient* TUK (*Theil's Inequality Coefficient*, TIC). Der TUK nimmt Werte zwischen null und eins an, wobei Werte nahe eins eine signifikante Abweichung zweier zeitbezogener Signale anzeigen und Werte nahe Null für eine gute Übereinstimmung von realem System und Simulation stehen.¹²⁹

Im *Vergleichstest mit aufgezeichneten Daten* (*Historical Data Validation*) wird auf bestehende Daten zurückgegriffen. Ein Teil dieser Daten wird für die Modellbildung verwendet. Der andere Teil wird in Form eines Vergleichstests für die Modellvalidierung herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass die Datenpakete statistisch unabhängig sein müssen. Werden die Daten beispielsweise chronologisch

¹²⁷ Vgl. Gass: Model Accreditation: A Rationale and Process for Determining a Numerical Rating, 1993.

¹²⁸ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 40.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 110.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 166.

¹²⁹ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 8 ff.

in einen älteren und einen neueren Datensatz aufgeteilt, von denen der eine für die Modellbildung und der andere für die Modellvalidierung herangezogen wird, dann darf das Modell bzw. das abzubildende System keiner Zeitabhängigkeit unterliegen. Das Modell ist dann valide, wenn es den Vergleichstest für den zweiten Datensatz besteht.¹³⁰

6.3.2 Fehlerimplementierungstest

Beim *Fehlerimplementierungstest* (*Failure Insertion Testing*) wird bewusst ein Fehler ins Modell eingebracht und bewertet, ob sich dieser Fehler wie erwartet auf die Simulation auswirkt.¹³¹ Ob die Fehlerauswirkung objektiv und quantitativ im realen System untersucht sein muss oder ob eine qualitative Experteneinschätzung ausreicht, wird nicht näher spezifiziert.

6.3.3 Feldtest

Im sogenannten *Feldtest* (*Field Testing*) wird das Modell in eine bestehende Simulationsumgebung implementiert. Zum Vergleich muss ein realer Feldtest durchgeführt werden, der in der Regel mit sehr großen Datenmengen, Aufwand und Kosten verbunden ist.¹³²

6.3.4 Funktionaler Test

Bei einem *funktionalen Test* (*Functional Testing* oder *Black-Box Testing*) wird das Modell als Black-Box behandelt. Es werden keine funktionalen Zusammenhänge innerhalb des Modells oder dessen Submodellen untersucht. Es wird lediglich analysiert, wie das Modell bestimmte Eingangsdaten in Ausgangsdaten umwandelt. Der Fokus liegt dabei auf der Genauigkeit der Datentransformation. Es ist nicht möglich, alle erdenklichen Input-Output-Transformationen bei komplexen Modellen zu betrachten. Dennoch kann mit dieser Methode das Modellvertrauen durch zunehmende Datensatzuntersuchungen gesteigert werden. Die absolute Anzahl richtig transformierter Inputdatensätzen macht jedoch keine Aussage über die Modellvalidität. Die getestete Anzahl von Datensätzen muss für die Bewertung in Relation zur möglichen Anzahl von Eingangswerten betrachtet werden.¹³³

¹³⁰ Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 166 f.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 98 f.

Vgl. Tsang: A broad view of model validation, 1989, S. 6.

¹³¹ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 42.

¹³² Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 43.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 30.

¹³³ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 43.

6.3.5 Ereignisvalidierung

Unter *Ereignisvalidierung* (*event validation*) wird die Erkennung bzw. das Eintreten bestimmter Ereignisse verstanden, die zwischen Modell und realem System identifiziert werden. Für die Bewertung werden die Art des Ereignisses sowie die zeitliche Sequenz miteinander verglichen. Die Ereignisvalidierung sollte zur Objektivierung mit Hypothesentest einhergehen. So kann beispielsweise definiert werden, wie oft ein bestimmtes Ereignis auftreten muss.¹³⁴ Eine beispielhafte Anwendung der Ereignisvalidierung stellt die Identifikation von Eingriffen des Antiblockiersystems (ABS) dar. Mit dieser Technik kann ein Nachweis erfolgen, dass das ABS in der Simulation in äquivalenten Situationen eingreift, wie im realen Fahrzeug. Diese Ereignisvalidierung gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, ob das ABS-Modell in Zusammenspiel mit dem Fahrzeug auf die gleiche Weise eingreift wie im realen System, sondern nur ob, wann und evtl. wie lange der Eingriff erfolgt.

6.3.6 Prädiktive Validierung

Die *prädiktive Validierung* (*predictive validation*) erfordert Eingangsdaten aus der Vergangenheit und Ausgangsdaten des realen Systemverhaltens. Das Modell wird mit den historischen Eingangsdaten ausgeführt. Es erfolgt ein Vergleich der Modellprädiktion mit dem tatsächlich eingetretenen Verhalten, das durch die Ausgangsdaten beschrieben wird. Durch Bestehen dieses Tests wird Vertrauen in die Annahme gestärkt, dass das Modell mit zeitlich aktuellen Eingangsdaten zukünftiges Systemverhalten vorhersagen kann. Diese Validierungstechnik setzt eine zeitlich konstante Entwicklung des betrachteten Systems voraus.¹³⁵

Ein nicht zeitbezogenes Verständnis von *prädiktiver Validierung* liegt vor, wenn durch diese Technik das Modellvertrauen parametrierungsunabhängig gestärkt werden soll. Dies ist erforderlich, wenn nicht für jeden möglichen Parametersatz entsprechende Realversuche durchgeführt werden können und das Modellverhalten basierend auf den erhobenen Daten interpoliert oder extrapoliert wird.¹³⁶ Wird beispielsweise ein Fahrzeugmodell für die Analyse des Fahrverhaltens in einem bestimmten Fahrmanöver herangezogen, wird das entsprechende reale Fahrzeugverhalten mit einer begrenzten Anzahl von Konfiguration mit dem Verhalten des Simulationsmodells verglichen, um das Modell zu validieren. Soll dieses Modell jedoch für mehrere Fahrzeugkonfigurationen, die sich durch Variation

¹³⁴ Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 30.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 98 f.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 166.

Vgl. Tsang: A broad view of model validation, 1989, S. 5.

¹³⁵ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 46.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 109.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 167.

Vgl. Tsang: A broad view of model validation, 1989, S. 6.

¹³⁶ Vgl. Kapitel 5.11.

einzelner Parameter (z.B. der Beladung oder einzelner Bauteileigenschaften) unterscheiden, oder sogar unterschiedliche Fahrzeuge, die sich durch vollständig geänderte Parametersätze auszeichnen, Anwendung finden, dann ist vollumfängliches Testen und Vergleichen von Simulationen und Messungen aus Aufwands- und Kostengründen nicht mehr möglich. In diesem Fall muss durch geeignete Strategien das Vertrauen gestärkt werden, dass das Modell für unterschiedliche Parametrierungen in definierten Wertebereichen das gewünschte Genauigkeitsmaß nicht unterschreitet und damit gültig ist. Es handelt sich hierbei um eine Modellvalidierung im strengsten Sinn, da der statistische Nachweis erfolgt, dass das Modell unabhängig (jedoch mit Einschränkungen) von seiner Parametrierung die Gültigkeitsanforderungen erfüllt und damit prädiktiv eingesetzt werden kann.

6.3.7 Regressionstest

Der *Regressionstest* (*regression testing*) wird zur Beweisführung, dass Fehlerkorrekturen oder Modifikationen im Modell keine anderen Fehler hervorrufen, angewendet. Wie beim Vergleichstest werden das Originalmodell und das veränderte Modell auf Basis bestehender Daten miteinander verglichen.¹³⁷

6.3.8 Modellanpassung

Ein von vielen Entwicklern verbotener Prozess ist die *Modellanpassung* (*model distortion*). Nach Murray-Smith kann die Modellanpassung jedoch auch als Validierungstechnik angewendet werden. Das Prinzip beruht auf der Annahme, dass ein Modell innerhalb seines Anwendungsbereichs gültig sein soll. In Form eines Vergleichstests werden unterschiedliche Systemzustände simuliert und in der Realität gemessen. Das Modell wird für jeden Systemzustand so angepasst, dass die Simulations- und die Messergebnisse übereinstimmen. Sind keine Modellanpassungen notwendig bzw. liegen die erforderlichen Anpassungen innerhalb der tolerierbaren Grenzen, gilt das Modell als valide.¹³⁸

Eine besondere Form der Modellanpassung im Zuge der Validierung ist die *Konditionierung* (*conditioning*). Sie wird von Romero behandelt. Er beschreibt die hierdurch erzielbare Verbesserung sogenannter *best-estimate plus uncertainty predictions* (BEPU).¹³⁹

¹³⁷ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 47.

¹³⁸ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 12.

¹³⁹ Vgl. Romero: Validated Model? Not So Fast. The Need for Model "Conditioning" as an Essential Addendum to Model Validation, 2007, S. 1 ff.

6.3.9 Test spezieller Eingangsgrößen

Im *Test spezieller Eingangsgrößen* (*special input testing*) wird das Modell mit besonderen Eingangsdatensätzen getestet. Die wichtigsten Ausführungsformen dieses Testverfahrens werden nachfolgend erläutert.¹⁴⁰

Im *Grenzwertest* (*boundary value testing*) werden die Eingangsgrößen eines Modells in Klassen eingeteilt und jeweils nur die Grenzwerte der Klassen untersucht. Ein Beispiel ist die stationäre Kreisfahrt als Querdynamikversuch für Fahrdynamiksimulationsmodelle. Unter der Annahme, dass der anwendungsbezogen relevante Querschleunigungsbereich zwischen 1 m/s² und 6 m/s² liegt und mit der Kenntnis, dass der lineare Bereich bei ca. 4 m/s² in den nicht-linearen Bereich übergeht, würden die Klassen *linearer Bereich* und *nicht-linearer Bereich* mit den angegebenen Grenzwerten definiert. Das Modell würde dann in diesem Beispiel nur für die vier Querschleunigungen 1 m/s² | 3,9 m/s² | 4,1 m/s² | 6 m/s² untersucht, sodass jede Klasse mit ihren beiden Grenzwerten im Versuchsplan vertreten ist.¹⁴¹

Beim *Test äquivalenter Aufteilung* (*equivalence partitioning testing*) werden die möglichen Eingangsgrößen in Klassen annähernd konstanten Verhaltens eingeteilt. Im Versuchsdesign ist folglich jede Klasse durch einen Eingangswert bzw. einen Datensatz von Eingangswerten berücksichtigt.¹⁴²

Beim *Test extremer Eingangsgrößen* (*extreme input testing, extreme condition test*) werden nur die beiden globalen Grenzdatensätze – also das Maximum und das Minimum – als Eingangsgrößen untersucht.¹⁴³

Der *Test invalider Eingangsgrößen* (*invalid input testing*) weist große Ähnlichkeit zum *Fehlerimplementierungstest* in Kapitel 6.3.2 auf.¹⁴⁴

Der *Test echtzeitbasierter Eingangsgrößen* (*real-time input testing*) dient insbesondere zur Beurteilung von Simulationsmodellen, die eingebettete Echtzeitsysteme repräsentieren.¹⁴⁵

¹⁴⁰ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 47.

¹⁴¹ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 47.

¹⁴² Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48.

¹⁴³ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48.
Vgl. Banks: Principles of Simulation, 1998, S. 23.

¹⁴⁴ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48.

¹⁴⁵ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48.

Im *Test selbstgesteuerter Eingangsgrößen (self-driven input testing)* wird das Modell mit zufällig generierten Eingangsdaten getestet, die aus probabilistischen Modellen, die ein zufälliges Phänomen eines realen oder zukünftigen Systems repräsentieren, entnommen werden.¹⁴⁶

Beim *Stresstest (stress testing)* soll die Arbeitsbelastung des Modells maximiert werden, z.B. indem die Anzahl von Ereignissen, auf die das Modell reagieren muss, in der Simulationsumgebung erhöht wird, oder indem die Stärke der auf das Modell einwirkenden Umgebungseinflüsse maximiert wird.¹⁴⁷

6.3.10 Sensitivitätsanalyse

Die *Sensitivitätsanalyse (sensitivity analysis)* ist ein formalisiertes und methodisches Nachweisverfahren. Sie basiert auf einer systematischen Änderung der Eingangsvariablen und Modellparameter über den für die Anwendung relevanten Wertebereich. Dabei werden die Auswirkungen der Varianz der Eingangsvariablen auf die Varianz der Ausgangsgrößen untersucht und damit die Einflussstärke der variierten Eingangsgrößen identifiziert. Die Sensitivitätsanalyse identifiziert die Parameter mit großem Einfluss auf das Modellverhalten, sodass bei diesen besonders einflussreichen Parametern größerer Fokus auf die Datenvalidität gelegt werden kann.¹⁴⁸ Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht einen Vergleich zwischen Modell und Messung, der qualitativ, quantitativ, relativ und absolut ausgerichtet sein kann, was unterschiedliche Validierungsziele und Modelluntersuchungen ermöglicht. Es wird zwischen drei Bereichen der Sensitivitätsanalyse unterschieden:¹⁴⁹

1. Das *Faktor Screening* dient zur qualitativen Unterscheidung von signifikanten und nicht signifikanten Eingangsgrößen (Faktoren). Screening-Methoden zeichnen sich im Vergleich zu quantitativen Verfahren durch den geringeren Aufwand aus.
2. Die *lokale Sensitivitätsanalyse* untersucht das Modellverhalten bei einem bestimmten Arbeitspunkt, z.B. einem lokalen Optimum. Hierbei werden nur kleine Variationen der Faktoren vorgenommen, um beispielsweise Stabilitätsuntersuchungen durchzuführen.

¹⁴⁶ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48.

¹⁴⁷ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 48 f.

¹⁴⁸ Vgl. Siebertz, van Bebber, Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 247.

Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 47.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 31.

Vgl. Gass: Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis, 1983, S. 614.

Vgl. Banks: Principles of Simulation, 1998, S. 23.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 102 f.

Vgl. Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 167.

¹⁴⁹ Vgl. Siebertz, van Bebber, Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 247.

-
3. Bei der *globalen Sensitivitätsanalyse* werden die Faktoren über ihren gesamten Wertebereich variiert und damit der gesamte Faktorraum hinsichtlich der Beeinflussung der Ausgangsgrößen analysiert. Diese Art der Sensitivitätsanalyse liefert umfassendes Modellverständnis und ist deshalb besonders für Validitätsuntersuchungen geeignet.

Nach Saltelli bestehen vier wichtige Anwendungen der Sensitivitätsanalyse:¹⁵⁰

1. Die *Faktor Priorisierung (Factor Priorization)* dient der Priorisierung bzw. der Einstufung der Eingangsgrößen entsprechend ihrer Einflussstärke auf die betrachteten Ausgangsgrößen. Hieraus kann beispielsweise abgeleitet werden, welche Modellparameter bzw. Modelleingangsgrößen aufgrund ihrer hohen Einflussstärke eine hohe Datengenauigkeit voraussetzen. Darüber hinaus kann die Faktor Priorisierung auch eine Information darüber liefern, inwiefern die Versuchsdurchführung und die Versuchsbedingungen die Ausgangsgrößen beeinflussen, woraus wiederum Anforderungen an das Experiment hinsichtlich der Kontrollierbarkeit von Einflussgrößen abgeleitet werden können.
2. Die *Identifikation von Parametern ohne signifikanten Einfluss auf die Ausgangsgrößen (Factor Fixing)* dient der Effizienzsteigerung der Sensitivitätsanalyse, indem diese Eingangsgrößen nicht untersucht werden, und der Vereinfachung von Modellen, indem diese Parameter vernachlässigt werden.
3. Die *Absenkung der Ausgangsvarianz auf einen bestimmten Grenzwert (Variance Cutting)* wird u.a. in Studien zur Risikobewertung eingesetzt, in denen sichergestellt werden muss, dass die Unsicherheiten bezüglich der Zuverlässigkeit eines Systems unterhalb der gegebenen Toleranzen liegen.
4. Bei dem *Faktor-Mapping (Factor Mapping)* wird die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells untersucht mit dem Ziel, die Eingangswerte zu bestimmen, die zu Ausgangsgrößen in einem definierten Wertebereich führen.

Da mit der Sensitivitätsanalyse auch strukturelle Modellfehler identifiziert werden können, ist sie für die operative Modellvalidierung prädestiniert.¹⁵¹ Bei den Sensitivitätsanalyse-Verfahren werden Techniken für lineare und für nichtlineare Modelle unterschieden, wobei letztere auch auf lineare Modelle angewendet werden können. Zu den wichtigsten Techniken für nichtlineare Modelle gehören die *Sensitivitätsanalyse nach Sobol* sowie der *Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST)* und dessen Erweiterung, der *extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (eFAST)*, der im Gegensatz zum FAST auch die Bestimmung der Interaktionskoeffizienten erlaubt.

¹⁵⁰ Vgl. Saltelli: Global Sensitivity Analysis, 2008, S. 156.

¹⁵¹ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 15 f.

Nähere Informationen zur Funktionsweise sowie den Stärken und Schwächen dieser Verfahren können der Fachliteratur¹⁵² entnommen werden. Statistische Versuchsplanung und Sensitivitätsanalysen sind eng miteinander verbunden. Grund dafür ist, dass die Modellanalysen so effizient wie möglich gestaltet werden sollen, was durch geschickte Auswahl von Stichproben erreicht werden kann. Siebertz et al. geben einen umfassenden Einblick in die statistische Versuchsplanung.¹⁵³

Schwieger hat bedeutende Sensitivitätsanalysemethoden entsprechend Abbildung 6-1 bzgl. Aussage, Gültigkeit und Modelleinschränkung charakterisiert.

Sensitivitätsanalysemethoden	Aussage	Gültigkeit	Modelleinschränkung
OAT-Design	qualitativ	lokal	linear
Morris-Design	qualitativ	global	nein
Normierte Sensitivitätsindizes	quantitativ	lokal	linear
Regressions- und Korrelationsanalyse	quantitativ	global	linear
Rangregressions- und Rangkorrelationsanalyse	quantitativ	global	monoton und additiv
Sensitivitätsindizes 1. Ordnung (SOBOL / FAST)	quantitativ	global	additiv
SOBOLs Sensitivitätsindizes	quantitativ	global	nein
Erweiterte FAST Indizes	quantitativ	global	Nein

Abbildung 6-1: Ausgewählte Sensitivitätsanalysemethoden und deren Eigenschaften¹⁵⁴

Bereits 1974 beschreibt Miller die Fähigkeiten der Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Validitätsgrades eines Simulationsmodells. Er wendet diese Methode in einer biologischen Anwendung – der Simulation der Populationsdynamik von Moskitos – an. Er beschreibt, dass eine Validierungsmethode erforderlich sei, die von dem Modell selbst ausgehe und damit nicht von dem Vergleich mit bestimmten Beobachtungen aus dem realen System (Messung) abhängig sei. Die Methode stellt eine Erweiterung der Sensitivitätsanalyse zur Erfassung von Modellparametern und deren Interaktion dar.

¹⁵² Vgl. u.a. Siebertz, van Bebber, Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung, 2010, S. 247 ff.

Vgl. u.a. Saltelli: Global Sensitivity Analysis, 2008.

Vgl. u.a. Saltelli, Tarantola, Campolongo, Ratto: Sensitivity Analysis in Practice: A guide to Assessing Scientific Models, 2004.

Vgl. u.a. Saltelli, Tarantola, Chan: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output, 1999.

Vgl. u.a. Schwieger: Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten, 2005.

Vgl. u.a. Pianosi, Sarrazin, Wagener: A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis, 2015.

Vgl. u.a. Marino, Hogue, Ray, Kirschner: A Methodology For Performing Global Uncertainty And Sensitivity Analysis In Systems Biology, 2009.

¹⁵³ Vgl. Siebertz, van Bebber, Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung, 2010.

¹⁵⁴ Quelle: Schwieger: Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten, 2005, S. 13.

Die aktuellen Unsicherheiten der Eingangsgrößen werden abgeschätzt und kombiniert, um die Modellungenauigkeit zu erfassen. Miller räumt ein, dass die Schwierigkeiten dieses Ansatzes in der Definition des Änderungsmaßes der Simulationsergebnisse und in dem Nachweis, dass die Ungenauigkeiten der Eingangsgrößen möglichst genau und mit hoher Sicherheit spezifiziert werden können, liegen. Die maximale akzeptable Abweichung des Systemverhaltens definiert Miller subjektiv. Sie dient als Entscheidungskriterium über die Modellvalidität. Solange die Auswirkungen der Input-Ungenauigkeiten auf die Änderung des Modell-Outputs innerhalb dieser akzeptablen Abweichung liegen, gilt das Modell als valide.¹⁵⁵

Auch Kleijnen, Professor für Simulation und Informationssysteme an der Tilburg University, beschreibt die Sensitivitätsanalyse als effiziente Validierungstechnik. Sie ist insbesondere dann anzuwenden, wenn Änderungen der Modellparameter, der Eingangsgrößen oder einzelner Module des Modells vorgenommen werden. Sie unterstützt aber auch die grundlegende Validitätsuntersuchung eines Modells. Kleijnen erläutert, dass insbesondere vorgelagerte Screeningprozesse zu einer Effizienzsteigerung der Sensitivitätsanalysen beitragen, weil sie mit wenig Aufwand eine Trennung von relevanten und nicht-relevanten Parametern, Eingangsgrößen oder Modellmodulen ermöglichen, was für die nachfolgende Sensitivitätsanalyse weniger Annahmen und höhere Effizienz bedeutet. Hierzu wendet er die Faktor-Screening-Methode *sequential bifurcation* an, die besonders einfach und effizient ist. Zur Effizienzsteigerung trägt auch die statistische Versuchsplanung (*Design of Experiments*, DoE) bei, die eine zuverlässige Schätzung von Haupt- und Interaktionseffekten bei gleichzeitig minimiertem Testaufwand gestattet. Des Weiteren spielen bei der Auswertung Regressionsanalysen eine wichtige Rolle.¹⁵⁶ Ebenso wie Miller beschreibt Kleijnen die Anwendung der Sensitivitätsanalyse auf Modelle, deren Anwendungszweck nicht in der Realität beobachtet werden kann, sodass kein Vergleich von Daten aus der Messung und der Simulation möglich ist. Er wendet die Validierungstechnik an, um nachzuweisen, dass die Modelleingangsgrößen die Ausgangsgrößen in der Art verändern, wie es Experten erwarten. Die Sensitivitätsanalyse ist sowohl auf das Gesamtmodell als auch auf dessen Submodelle anzuwenden. Kleijnen demonstriert die Technik am Beispiel eines Sonar-Modells.¹⁵⁷

6.3.11 Statistische Techniken

Statistische Techniken (Statistical Techniques) erfordern eine vollständige Beobachtbarkeit des Systems für die Modellvalidierung. Grundlage ist die Ausführung des Modells unter den Bedingungen des realen Systems, sodass die Vergleichbarkeit des Modellverhaltens mit dem realen Systemverhalten ermöglicht wird. Es gibt unterschiedliche Techniken, die auf diese Art von Datensätzen angewen-

¹⁵⁵ Vgl. Miller: *Sensitivity Analysis and Validation of Simulation Models*, 1974, S. 345 ff.

¹⁵⁶ Vgl. Kleijnen: *Experimental Design for Sensitivity Analysis, Optimization, and Validation of Simulation Models*. In Banks: *Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 1998, S. 211 f.

¹⁵⁷ Vgl. Kleijnen: *Case Study - Statistical validation of simulation models*, 1995, S. 21.

Vgl. Kleijnen: *Experimental Design for Sensitivity Analysis, Optimization, and Validation of Simulation Models*. In Banks: *Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, 1998, S. 210 f.

det werden können. Hierzu gehören z.B. *Varianzanalysen, Konfidenzintervalle, Faktoranalysen, Hotelling's T^2 Tests, Multivariate Varianzanalysen, Regressionsanalysen, Zeitreihenanalysen* und *t-Tests*. Die Zuordnung vieler Techniken zu den jeweiligen Entwicklern und Veröffentlichungen kann dem *Handbook of Simulation* entnommen werden. Einblicke in die Vielzahl der Techniken liefern die referenzierten Quellen.¹⁵⁸ Insbesondere für Konfidenzintervalle – auch als Vertrauensbereiche bezeichnet – bestehen unterschiedliche Ansätze der Bestimmung.¹⁵⁹ Die Sensitivitätsanalyse wird in der Literatur häufig auch den statistischen Techniken zugeordnet, da sie mit ihnen eng verbunden ist, was z.B. die in Kapitel 6.3.10 beschriebenen Erkenntnisse von Kleijnen zeigen. Da sie jedoch nicht zwingend die Beobachtbarkeit des Systems voraussetzt, wird sie in diesem Bericht als eigenständige Technik aufgeführt.

Law gibt einen Überblick über grundlegende statistische Techniken für den Umgang mit Simulationsdaten. Er unterscheidet zwischen der Statistik für abgeschlossene Simulationen und Techniken für nicht-endende Simulationen.¹⁶⁰

Balci empfiehlt eine Validierungsmethode, die auf *simultanen Konfidenzintervallen (simultaneous confidence intervals)* basiert. Ein Simulationsmodell mit mehreren Ausgangsgrößen besitzt für jede dieser Größen ein eigenes Konfidenzintervall für die Bewertung der Differenz zwischen Simulation und Systembeobachtung. Er stellt Berechnungsverfahren vor, wie aus den einzelnen Konfidenzintervallen ein simultanes Konfidenzintervall für das Modell bestimmt wird. Dieses simultane Konfidenzintervall bestimmt den Genauigkeitsgrad des Modells (*model range of accuracy*).¹⁶¹

Chen et al. beschreiben ebenfalls eine Validierungstechnik, die auf Konfidenzintervallen beruht. Die Motivation für die Anwendung sind die Unsicherheiten der Modellierung, der Fertigung und der Messsysteme. Sie erklären, dass der Validierungsansatz deshalb auf stochastischen Messungen basieren müsse, um Modellvertrauen zu erzeugen. Sie entwickeln eine Validierungsmethode, die auf der Fortpflanzung von Unsicherheiten und Datentransformationen aufbaut. Ihre Technik reduziert die Anzahl physikalischer Tests durch Verschiebung des Bewertungsaufwands auf die Unsicherheitsfort-

¹⁵⁸ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 49 f.

Vgl. Balci: Credibility Assessment of Simulation Results: The State of the Art, 1986, S. 8.

Vgl. Sargent: Statistical Analysis of Simulation Output Data, 1976.

¹⁵⁹ Vgl. Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models, 1984, S. 120.

Vgl. Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, 1985, S. 19.

Vgl. Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models, 2000, S. 55 f.

Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 127.

Vgl. Sargent: Statistical Analysis of Simulation Output Data, 1976, S. 39 ff.

¹⁶⁰ Vgl. Law: Statistical Analysis of Simulation Output Data: the Practical State of the Art, 1983.

¹⁶¹ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 49 ff.

pflanzung im Modell. Mittels der Response-Surface-Methode werden Metamodelle erzeugt, die kostengünstige Annäherungen von Simulationsmodellen für die Unsicherheitsfortpflanzung darstellen.¹⁶²

Oberkampff et al. betrachten Modellungenauigkeiten anderen Ursprungs. Sie untersuchen die Schätzung von Unsicherheiten von Simulationsmodellen, die unter anderem durch die numerische Lösung partieller Differentialgleichungen hervorgerufen werden.¹⁶³ Darüber hinaus entwickeln Oberkampff und Barone zwei Metriken, denen statistische Konfidenzintervalle zugrunde liegen. Die erste Metrik basiert auf der Interpolation experimenteller Daten, während die zweite eine Regression dieser Daten erfordert.¹⁶⁴ Den Stand der Wissenschaft für den Vergleich von Messung und Simulation stellen Oberkampff et al. im Jahr 2004 anhand von sechs Diagrammen dar.¹⁶⁵ Diagramm 1 zeigt einen typischen getrennten graphischen Vergleich von Messung und Simulation, der der subjektiven Validierungstechnik *Augenscheinvalidierung* (siehe Kapitel 6.2.2) zuzuordnen ist. Diagramme 2 bis 5 zeigen den Ausgangswert in Abhängigkeit des Eingangswertes. In Diagramm 2 erfolgt ein in der Praxis sehr häufig durchgeführter quantitativer Vergleich ohne Vertrauensmaß, das in Diagramm 3 für die Messwerte des realen Versuchs ergänzt ist. In den Diagrammen 4 und 5 werden zusätzlich die numerischen Fehler der Simulation und die Toleranzen der Eingangsgrößen berücksichtigt, wobei in Diagramm 6 auch nichtdeterministische Simulationen adressiert sind. Diagramm 5 liegen die gleichen Informationen zugrunde wie Diagramm 6, jedoch zeigt letzteres eine Differenzdarstellung, anhand derer über die Abweichung zur horizontalen Nulllinie die Validität bewertet werden kann.¹⁶⁶

Kleijnen beschreibt in Abhängigkeit der verfügbaren Realsystem-Daten, welche statistischen Techniken zur Modellvalidierung genutzt werden können:¹⁶⁷

- Wenn keine realen Daten verfügbar sind, müssen Experimentdaten mittels Simulationen erzeugt werden. Hierzu ist die statistische Theorie der Versuchsplanung (*Design of Experiments, DoE*) anzuwenden. In der Auswertung kommt dann die Sensitivitätsanalyse zum Einsatz. Die Modellbewertung erfolgt basierend auf qualitativem Expertenwissen.
- Sind Ausgangsdaten des realen Systems verfügbar, erfolgt ein Modellvergleich unter Anwendung der *two sample Student's t statistic* bei Normalverteilungen oder einem statistischen

¹⁶² Vgl. Chen, Baghdasaryan, Buranathiti, Cao: Model Validation via Uncertainty Propagation and Data Transformations, 2004, S. 1406.

¹⁶³ Vgl. Oberkampff, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: A New Methodology for the Estimation of Total Uncertainty in Computational Simulation, 1999.

Vgl. Oberkampff, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: Estimation of Total Uncertainty in Modeling and Simulation, 2000.

Vgl. Oberkampff, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: Error and uncertainty in modeling and simulation, 2002.

¹⁶⁴ Vgl. Oberkampff, Barone: Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics, 2006, S. 5 ff.

¹⁶⁵ Entsprechende Abbildung siehe Oberkampff, Trucano, Hirsch: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics, 2004, S. 368.

¹⁶⁶ Vgl. Oberkampff, Trucano, Hirsch: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics, 2004, S. 368 ff.

¹⁶⁷ Kleijnen: Validation of Models: Statistical Techniques and Data Availability, 1999, S. 647 ff.

Verfahren für nicht-normalverteilte Ergebnisse, wie z.B. *distribution-free test* oder *bootstrapping*.

- Wenn sowohl Eingangs- als auch Ausgangsdaten verfügbar sind, ist eine aufzeichnungsgeführte (*trace-driven*) Simulation möglich. Dies bedeutet, dass das Modell mit den realen Eingangsdaten betrieben wird, um die Ausgangsgrößen zu vergleichen. Die Validierung sollte nicht auf dem gewöhnlichen Weg der zeitbezogenen Diagramme mit Streuband und anschließender Prüfung der Übereinstimmung, sondern auf Regressions- (bei Normalität) oder Bootstrapverfahren (bei Nicht-Normalität) beruhen.

In einer weiteren Veröffentlichung gibt Kleijnen einen Überblick über die statistikbasierten Verifikations- und Validierungstechniken. Er beschreibt die Kontrolle von Zwischenergebnissen durch Überwachung (tracing) und statistisches Testen von Modulen, die Anwendung statistischer Vergleichsmethoden für Ausgangsgrößen der Simulation und analytische Ergebnisse sowie die Animation. Darüber hinaus diskutiert er im Kontext der Modellvalidierung

- den Umgang mit Daten des realen Systems,
- den Vergleich von simulierten und realen Daten mittels einfacher graphischer Tests, *Schruben-Turing* und *t-Tests*,
- neue statistische Methoden, die auf *Regressionsanalysen* basieren, zur Korrelationsprüfung von Messung und Simulation,
- die *Sensitivitätsanalyse* basierend auf *statistischer Versuchsplanung* und *Regressionsanalysen* sowie *Risiko- und Unsicherheitsanalysen*, denen *Monte Carlo Sampling* zugrunde liegt,
- sowie den Unterschied von White Box- und Black Box-Simulationsmodellen.¹⁶⁸

In sechs Berichten einer Veröffentlichungsreihe der Sandia National Laboratories, an denen Hills als Autor mitwirkte, werden statistik- und wahrscheinlichkeitsbasierte Validierungsmetriken beschrieben. Im ersten Bericht¹⁶⁹ werden statistische Methoden zur Entwicklung von Validierungsmetriken für lineare und nichtlineare Modelle vorgestellt. Sensitivitätsanalysemethoden und die Monte-Carlo-Methode werden angewendet, um Vorhersageunsicherheiten von Modellen zu bewerten. Die Techniken werden u.a. auf das Modell eines gedämpften Ein-Massen-Schwingers angewendet.¹⁷⁰ Zwei Validierungsansätze werden genannt. In der statistischen Standardmethode wird das Experiment in der Realität mehrfach und unabhängig wiederholt, sodass basierend auf den Messwerten die Streuung bzw. Unsicherheit bestimmt wird. Da dies in der Realität häufig nicht möglich ist, beschreiben Hills und Trucano als zweite Möglichkeit die Systemanalyse. Die Vorhersage der Unsicherheiten basiert dann auf den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der einflussreichen Modellparameter. Infolge muss der Nachweis erbracht werden, dass die modellbasierten Vorhersagen statistisch mit den realen

¹⁶⁸ Vgl. Kleijnen: Verification and validation of simulation models, 1995, S. 145 ff.

¹⁶⁹ Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Background, 1999.

¹⁷⁰ Vgl. Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Background, 1999, S. i.

Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005, S. 1.

Beobachtungen konsistent sind.¹⁷¹ In der zweiten Veröffentlichung¹⁷² wird eine Metrik eingeführt, die die erwartete Modellanwendung auf die Messdaten von Validierungsexperimenten bezieht.¹⁷³ 2001 präsentieren Hills und Trucano im dritten Bericht¹⁷⁴ die Maximum-Likelihood-Methode (*maximum likelihood approach*). Der Vorteil liegt in der Anwendbarkeit auf stark nicht-lineare Systeme. Die Methode basiert auf Optimierungsverfahren. Zudem kann sie mit nicht-normalverteilten Unsicherheiten der Messergebnisse und der Modellparameter umgehen.¹⁷⁵ Im vierten Bericht¹⁷⁶ kombinieren Hills und Leslie den anwendungsbezogenen Validierungsansatz aus dem zweiten Report mit dem Maximum-Likelihood-Ansatz aus der vorangegangenen Veröffentlichung. Diese Technik ermöglicht die Gewichtung von Messungen eines Validierungsexperiments hinsichtlich ihrer Repräsentation der Zielanwendung. Die Gewichtung beeinflusst den Vergleich von Messungs- und Simulationsergebnissen sowie die Rückschlüsse, die daraus gezogen werden.¹⁷⁷ Grundlage ist die Sensitivitätsanalyse erster Ordnung, um nachzuweisen, dass die Validierungsexperimente die Zielanwendung des Modells repräsentieren, um die Messdaten entsprechend ihrer Repräsentativität zu gewichten und um die Sensitivitäten von Entscheidungsgrößen auf Unsicherheiten der Messdaten und der Modellparameter zu untersuchen.¹⁷⁸ In der fünften Veröffentlichung¹⁷⁹ wird die Anwendung der Modellvalidierungsmetriken von Hills und Trucano am Beispiel des thermischen Zerfalls von Schaum beschrieben. Der sechste Bericht¹⁸⁰ behandelt die Modellvalidität unter der Voraussetzung, dass der Einsatzbereich des Modells bezogen auf dessen Testumgebung extrapoliert wird.¹⁸¹ Die Veröffentlichungen der Sandia National Laboratories zum Thema Modellvalidierung ist nicht auf diese sechs Berichte beschränkt. U.a. wirkten Trucano, Oberkampf und Hills an weiteren Veröffentlichungen¹⁸² mit.

¹⁷¹ Vgl. Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Background, 1999, S. 39 f.

¹⁷² Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Model with Application to CTH, 2001.

¹⁷³ Vgl. Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005, S. 1.

¹⁷⁴ Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: A Maximum Likelihood Based Metric, 2002.

¹⁷⁵ Vgl. Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: A Maximum Likelihood Based Metric, 2002, S. 3.

¹⁷⁶ Hills, Leslie: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Validation Experiments to Application, 2003.

¹⁷⁷ Vgl. Hills, Leslie: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Validation Experiments to Application, 2003, S. 3, 15.

¹⁷⁸ Vgl. Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005, S. 1 f.

¹⁷⁹ Hills, Leslie, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Application to the Abnormal Environment, 2004.

¹⁸⁰ Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005.

¹⁸¹ Vgl. Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation, 2005, S. 1.

¹⁸² Vgl. Trucano, Easterling, Dowding, Paez, Urbina, Romero, Rutherford, Hills: Description of the Sandia Validation Metrics Project, 2001.

Vgl. Trucano, Swiler, Igusa, Oberkampf, Pilch: Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's What, 2006.

Sarin et al. beschäftigen sich umfassend mit objektiven, statistikbasierten Vergleichstechniken für zeitbezogene Daten aus der Simulation und dem realen Versuch im Anwendungsfeld der Fahrzeugsicherheit. Sie beschreiben sieben unterschiedliche Techniken und bewerten deren Eignung. Diese sind (1) *Vektornormen* bzw. *p-Normen*, die insbesondere Schwächen bezüglich der Erkennung zeitlicher Fehler haben, (2) *Standardabweichung der Residuen*, (3) *Korrelationskoeffizienten*, (4) die *Sprague and Geers metric*, die Fehler des Wertes und der Phase kombiniert, (5) *Russell's error measure*, die ähnlich zu der zuvor genannten Metrik ist, (6) der *Normalized Integral Square Error*, der die Kreuzkorrelation nutzt und einen Fehler für die Phase, die Größe und die Form bestimmt, und (7) das *Dynamic Time Warping*, einem Verfahren, das ursprünglich für die Spracherkennung entwickelt wurde und die Ähnlichkeiten zweier zeitlicher Signale bewertet. Sarin et al. empfehlen eine Metrik, die basierend auf einer Auswahl aus den vorgestellten Techniken den Phasenfehler, den Größenfehler und einen Topologiefehler quantifiziert. Die prädiktiven Fähigkeiten eines Modells werden als akzeptabel bewertet, wenn die Fehler der Simulation kleiner oder gleich dem Fehlerbereich der realen Versuche sind.¹⁸³

Klemmer et al. beschreiben ein objektives Verfahren zur Bestimmung von Vertrauensbereichen bzw. Konfidenzintervallen, um basierend darauf die Übereinstimmung zweier zeitbezogener Signale objektiv zu bewerten. Für das Referenzsignal, das in der Regel das reale System anhand einer Messung widerspiegelt, werden eine konstante Zeittoleranz t_{Tol} und eine zeitabhängige Signaltoleranz $y_{\text{Tol}}(t_i)$ definiert. Basierend auf diesen Werten wird ein Rechteck mit entsprechenden Seitenlängen um jeden Datenpunkt des Referenzsignals im Signal-Zeit-Diagramm gelegt.¹⁸⁴ Für hochdynamische Systeme empfehlen die Autoren, das Rechteck durch eine Ellipse zu ersetzen. Liegen die Simulationskurven innerhalb des Toleranzbandes, hat das Modell den maximalen Genauigkeitslevel erreicht.¹⁸⁵

Klemmer et al. berechnen für die Validitätsbeurteilung von Simulationsmodellen ein Korrelationsmaß (*Correlation Rating*, *CR*). Hierzu wird das Toleranzband schrittweise um ganzzahlige Faktoren von 1 bis 10 vergrößert. Für jede Faktorstufe wird die Anzahl n_i der Datenpunkte aus der Simulation bestimmt, die zusätzlich zu den vorherigen Faktorstufen im nun vergrößerten Toleranzband liegen. N ist die Gesamtanzahl der Datenpunkte des Simulationssignals.¹⁸⁶

¹⁸³ Vgl. Sarin, Kokkolaras, Papalambros, Barbat, Yang: A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Model with Emphasis on Vehicle Safety Applications, 2008, S. 1 ff.

¹⁸⁴ Entsprechende Abbildung siehe Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 751.

¹⁸⁵ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 750 f.

¹⁸⁶ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 751 f.

Entsprechend folgender Gleichung wird mit diesen Informationen CR berechnet:¹⁸⁷

$$CR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{10} (10 - i + 1) \cdot n_i$$

Auf die weitere Verwendung von CR als Qualitätsmaß eines Modells wird in Kapitel 6.4.3 näher eingegangen.

6.3.12 Hypothesentest

Hypothesentests werden durchgeführt, um zu entscheiden, welche von zwei Hypothesen – die Nullhypothese oder die alternative Hypothese – richtig ist.¹⁸⁸ Sie werden in der Literatur auch vorgeschlagen, um ein Modell zu validieren. Vielfach werden Hypothesentests auch den statistischen Techniken zugeordnet.

Sargent erklärt das Grundprinzip des Hypothesentests. Demnach müssen im ersten Schritt die zu testenden Hypothesen festgelegt werden. Die Nullhypothese H_0 besagt, dass das Modell für den definierten Einsatzzweck und die Genauigkeitsanforderungen valide ist. H_1 ist die Gegenhypothese. Zwei Fehler sind möglich. Fehlertyp 1 ist die Zurückweisung eines validen Modells. Fehlertyp 2 ist die Akzeptanz der Validität eines nicht-validen Modells. Fehlertyp 1 fällt unter das Risiko des Modellentwicklers, während Fehlertyp 2 das Risiko des Modellanwenders betrifft. Hypothesentests ermöglichen nach Sargent die Einführung eines Validitätsmaßes, das auf Wahrscheinlichkeitswerten beruht.¹⁸⁹

Murray-Smith erläutert, dass Hypothesentests zu einer Entwicklung von modellstrukturunterscheidenden Versuchen führen können, um konkurrierende Modelle zu differenzieren.¹⁹⁰

Hartmann et al. erläutern den gebräuchlichen Weg, Daten miteinander zu vergleichen. Sie erklären, dass für eine Methodvalidierung die Definition eines Intervalls akzeptabler Werte und die Anwendung von Intervall-Hypothesentests gegenüber einem typischen Punkt-Hypothesentest zu bevorzugen sind. In ihrer Methode kommen Signifikanztests zum Einsatz.¹⁹¹

¹⁸⁷ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 751.

¹⁸⁸ Vgl. Hartmann, Smeyers-Verbeke, Penninckx, Heyden, Vankeerberghen, Massart: Reappraisal of Hypothesis Testing for Method Validation, 1995, S. 4492.

¹⁸⁹ Vgl. Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models, 1984, S. 119 f.

Vgl. Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models, 1985, S. 20 f.

Vgl. Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models, 2000, S. 56 f.

Vgl. Sargent: Verifying and Validating Simulation Models, 2014, S. 126 f.

¹⁹⁰ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 11.

¹⁹¹ Vgl. Hartmann, Smeyers-Verbeke, Penninckx, Heyden, Vankeerberghen, Massart: Reappraisal of Hypothesis Testing for Method Validation, 1995, S. 4491.

Lee und Poolla beschäftigen sich mit statistischer Modellvalidierung. Ihr Fokus liegt auf Bayes'scher Statistik und Hypothesentests.¹⁹²

Mahadevan und Rebba beschreiben ebenfalls eine auf Bayes'schen Netzwerken basierende Validierungsmethode, die Anwendung findet, wenn ein vollumfänglicher Test des Modells nicht möglich ist. Submodell-Validierung wird hiermit kombiniert, um ein Validitätsmaß für die übergeordnete Zuverlässigkeitsschätzung zu erhalten. Bayes'sche Netzwerke werden für die Übertragung von Validitätsinformationen von den Submodellen zum Gesamtmodell angewendet. Mahadevan und Rebba berücksichtigen Messungenauigkeiten und die Verteilungen der Ausgangsgrößen des Modells werden für die Berechnung einer Validierungsmetrik basierend auf Bayes'schen Hypothesentests herangezogen.¹⁹³ In einer zweiten Veröffentlichung zusammen mit Huang beschreiben sie eine Methode zur Modellfehlerabschätzung, die Modellform-, Diskretisierungs-, stochastische Analyse- sowie Input- und Outputdatenfehler berücksichtigt.¹⁹⁴ Der Bayes'sche Ansatz unterscheidet sich vom klassischen Hypothesentest dadurch, dass er die Akzeptanz des Modells adressiert und nicht dessen Zurückweisung anstrebt.¹⁹⁵

6.3.13 Submodelltest, Modultest

Submodelltests bzw. *Modultests* (*submodel / module testing*) erfordern eine hierarchische Strukturierung des Modells und des realen Systems in Submodelle bzw. Module. Es erfolgt eine Validitätsuntersuchung jedes Submodells. Der Submodelltest bzw. Modultest wird insbesondere bei komplexen Systemen angewendet, die im Bottom-up-Verfahren entwickelt werden. Die Zusammensetzung des Gesamtmodells aus validierten Submodellen bedeutet jedoch nicht, dass auch das Gesamtmodell valide ist.¹⁹⁶

6.3.14 Top-Down-Test

Das *Top-Down-Testen* (*top-down testing*) ist eng verwandt mit dem *Submodelltest* bzw. *Modultest*. Es grenzt sich dadurch ab, dass der Top-Down-Test an den Modellentwicklungsprozess angepasst ist und die einzelnen Tests top-down, d.h. beginnend mit dem globalen Modell hin zum kleinsten Modul, durchgeführt werden.¹⁹⁷

¹⁹² Vgl. Lee, Poolla: On Statistical Model Validation, 1996, S. 131 ff.

Vgl. Lee, Poolla: Statistical Validation for Uncertainty Models, 1994, S. 197 ff.

¹⁹³ Vgl. Mahadevan, Rebba: Validation of reliability computational models using Bayes networks, 2003, S. 223.

¹⁹⁴ Vgl. Rebba, Mahadevan, Huang: Validation and error estimation of computational models, 2006, S. 1390.

¹⁹⁵ Vgl. Mahadevan, Rebba: Validation of reliability computational models using Bayes networks, 2003, S. 225 ff.

¹⁹⁶ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 55.

Vgl. Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies, 1990, S. 31.

Vgl. Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, 2008, S. 106 f.

¹⁹⁷ Vgl. Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998, S. 56.

6.3.15 Wissensbasierte Validierung

Die *wissensbasierte Validierung (knowledge-based validation)* ist ein theoretischer Ansatz mit dem Ziel der Vollautomation der Modellvalidierung. Grundlage ist eine Wissensdatenbank mit eindeutigen, in der Regel theoriebasierten Ereignissen bzw. Erwartungen, deren korrekte Wiedergabe die Anforderung an das Simulationsmodell ist und automatisiert überprüft werden kann. Für komplexe Modelle mit vielfältigen Einflussfaktoren ist diese Technik jedoch nicht bzw. nur in Ansätzen anwendbar.¹⁹⁸

6.4 Maße für Modellvalidität

Alle Validierungsprozesse haben gemeinsam, dass am Ende eine Aussage über die Modellvalidität und damit über das Vertrauen in das Modell getroffen wird. In diesem Kapitel werden drei Ansätze aus der Literatur aufgezeigt, die über ein rein binäres Maß mit den zwei Beurteilungen *valide* und *nicht valide* bzw. *invalide* hinausgehen.

6.4.1 Validitätslabel

Das von Gass und Joel eingeführte Label¹⁹⁹ ist an ihren Validierungsprozess, der in Kapitel 5.3 beschrieben wird, angepasst. Auf einer Skala von 1 bis 5 werden sieben Kriterien (Definition, Struktur, Daten, Verifikation, Validierung, Verwendbarkeit und Herkunft) bewertet. Anhand der Punktevergabe lassen sich Simulationsmodelle miteinander vergleichen und die Entscheidung treffen, ob das Modell für den jeweiligen Einsatzzweck geeignet ist.²⁰⁰

6.4.2 Validitätsskala

Logan und Nitta führen eine Verifikations- (*VER Meter*) und eine Validitätsskala²⁰¹ (*VAL Meter*) ein. Die Validitätsskala gilt für ein Modell und dessen Anwendungsbereich. Sie entspricht einer Modellbewertung zwischen 0 und 10 Punkten in Abhängigkeit der Erfüllung definierter Kriterien (z.B. Lauffähigkeit der Simulation, Kalibrierung, qualitativ korrekte Sensitivitäten, vernachlässigbare Modellsicherheiten). Die Validitätsskala ist nicht absolut objektiv bzw. formal.²⁰²

¹⁹⁸ Vgl. Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review, 1998, S. 17 f.

¹⁹⁹ Entsprechende Abbildung siehe Gass, Joel: Concepts of Model Confidence, 1981, S. 345.

²⁰⁰ Vgl. Gass, Joel: Concepts of Model Confidence, 1981, S. 343 ff.

²⁰¹ Entsprechende Abbildung siehe Logan, Nitta: Verification & Validation (V&V) Methodology and Quantitative Reliability at Confidence (QRC): Basis for an Investment Strategy, 2002, S. 20.

²⁰² Vgl. Logan, Nitta: Verification & Validation (V&V) Methodology and Quantitative Reliability at Confidence (QRC): Basis for an Investment Strategy, 2002, S. 18 ff.

Vgl. Logan, Nitta: Verification & Validation: Process and Levels Leading to Qualitative or Quantitative Validation Statements, 2003, S. 3.

Vgl. Logan, Nitta: Validation, Uncertainty, and Quantitative Reliability at Confidence (QRC), 2003, S. 6.

Vgl. Logan, Nitta, Chidester: Risk Reduction as the Product of Model Assessed Reliability, Confidence, and Consequence, 2005, S. 196.

6.4.3 Metrisches Qualitätsmaß

Klemmer et al. führen ein objektives, mathematisches Qualitätsmaß für Simulationsmodelle ein, dessen Bestimmung in dem in Kapitel 5.15 beschriebenen Validierungsprozess eingebettet ist. Dieses setzt sich aus der Signalkorrelation (*Signal Correlation, SC*) und dem Validitätsbereich (*Validation Coverage, VC*) zusammen.²⁰³

SC quantifiziert auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut), wie genau die simulierten und die referenzierten Signale übereinstimmen. Die metrischen Validitätskriterien sind anwendungsabhängig. Für jedes Kriterium wird eine Korrelationsbewertung (*Correlation Rating, CR*) entsprechend der Beschreibung in Kapitel 6.3.11 bestimmt. Ein Gewichtungsfaktor *W* wird für jedes Validitätskriterium einmal pro Lastfall und pro Modell definiert. Damit ist es möglich, Modelleigenschaften entsprechend den Anforderungen zu gewichten. Die Ungenauigkeit der referenzierten Daten – in der Regel Messdaten – wird über die Datenzuverlässigkeit (*Data Reliability, DR*) berücksichtigt.²⁰⁴

Damit gilt für die *i*-te Variante (engl.: Item) eines Lastfalls mit *j* metrischen Validitätskriterien (engl.: Signals):²⁰⁵

$$SC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{Signals}} W_j \cdot DR_{i,j}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{Signals}} CR_{i,j} \cdot W_j \cdot DR_{i,j}$$

Für einen Lastfall gilt dann:²⁰⁶

$$SC_{LoadCase} = \frac{1}{N_{Items}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{Items}} SC_i$$

Die totale Signalkorrelation des Modells ist der Mittelwert, der sich aus den *SC*-Werten aller Lastfälle berechnet.²⁰⁷

Da das Vertrauensmaß zusätzlich zur Übereinstimmungsgenauigkeit auch von der Anzahl der im Validierungsprozess untersuchten Lastfälle abhängig ist, setzt *VC* die Anzahl der betrachteten und der möglichen Lastfälle ins Verhältnis. *VC* ist somit ein Signifikanzmaß. *VC* gleich 100 % bedeutet, dass für alle Lastfälle und deren *i* Varianten, die den gesamten Anwendungsbereich des Modells abdecken, alle metrischen Validitätskriterien der Simulations- und Referenzdaten miteinander verglichen wurden. Es bedeutet jedoch nicht, dass zwangsweise alle möglichen Lastfallvarianten mit allen mögli-

²⁰³ Entsprechende Abbildung siehe Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 746.

²⁰⁴ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 746 f.

²⁰⁵ Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747.

²⁰⁶ Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747.

²⁰⁷ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747.

chen Konfigurationen von Eingangsdatensätzen, Umgebungsvariablen und Betriebszuständen verglichen wurden. Die Anzahl der Validierungslastfälle kann kleiner sein als die Anzahl der möglichen Lastfälle.²⁰⁸

Der Validitätsbereich VC in Prozent wird gemäß folgender Gleichung aus der Anzahl der metrischen Validitätskriterien (engl.: Signals), der Anzahl der Lastfallvarianten (engl.: Items), der Erfassungspunktberücksichtigung (*Coverage Point*, CP), dessen Wert 1 ist, wenn der Vergleich durchgeführt wird, oder 0 beträgt, wenn keine Vergleichsdaten vorliegen, und der Datenzuverlässigkeit (*Data Reliability*, DR) berechnet:²⁰⁹

$$VC_{LoadCase} = \frac{100\%}{N_{Signals} \cdot N_{Items}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{Items}} \sum_{j=1}^{N_{Signals}} CP_i \cdot DR_{i,j}$$

Der totale Validitätsbereich des Modells ist der Mittelwert, der sich aus den VC -Werten aller Lastfälle berechnet.²¹⁰

Die Modellqualität wird im Format {SC, VC}, z.B. {7.5, 82%}, angegeben und zu jedem Verifikationsprozess eines Modells wird ein Bericht mit vordefinierten Inhalten erstellt.²¹¹

²⁰⁸ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747 f.

²⁰⁹ Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747.

²¹⁰ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 747.

²¹¹ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 748, 757.

7 Überblick über Validierungsstudien in der Fahrdynamik

Die bisher umfassendste und aktuellste Übersicht über bestehende Veröffentlichungen, die sich explizit mit der Modellvalidierung in fahrdynamikbezogenen Anwendungen auseinandersetzen, liefern Kutluay und Winner²¹². Tabelle 1 ist eine überarbeitete und erweiterte Übersichtstabelle über die bestehenden Validierungsstudien in der Fahrdynamik in Anlehnung dieser Veröffentlichung.

Tabelle 1: Überblick über bestehende Validierungsstudien in der Fahrdynamik²¹³

Autor(en) und Titel der Veröffentlichung, [Kapitelverweis]	Modellanwendung	Überblick Validierungsstudie (1) Untersuchung, (2) Testverfahren, (3) Analyse, (4) Metrik
Allen, Chrstos, Howe, Klyde, Rosenthal: Validation of a non-linear vehicle dynamics simulation for limit handling ²¹⁴ [Kapitel 7.1]	Längs-, Querdynamik (Handling)	(1) Parameter- und Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver, tlw. bezogene Größen (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik
Allen, Lee, Klyde, Howe, Chrstos, Rosenthal: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation ²¹⁵ [Kapitel 7.1]	Längs-, Quer-, Vertikaldynamik (Handling)	(1) Bedeutung nichtlinearer Effekte (2) Stationäre und transiente Manöver, tlw. bezogene Größen (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik
Allen, Rosenthal: Requirements for vehicle dynamics simulation models ²¹⁶ [Kapitel 7.1]	Längs-, Quer-, Vertikaldynamik (Handling)	(1) Komplexität von Modellen (2) keine Testspezifikation (3) Analyse im Zeitbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistischen Techniken, keine objektive Validierungsmetrik
Allen, Rosenthal, Klyde, Owens, Szostak: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis ²¹⁷ [Kapitel 7.1]	Längs-, Quer-, Vertikaldynamik (Handling)	(1) Parameter- und Modellvalidität, Konsistenzprüfung (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistischen Techniken, keine objektive Validierungsmetrik
Alasty, Ramezani: Genetic Algorithm Based Parameter Identification of Nonlinear Full Vehicle Ride Model ²¹⁸ [Kapitel 7.2]	Vertikaldynamik (Fahrkomfort)	(1) Parameteridentifikationsverfahren zur Erzeugung valider Modelle (2) Transiente Vertikalanregung auf einem Hydropulsprüfstand (3) Analyse im Zeitbereich (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik
Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics ²¹⁹ [Kapitel 7.3]	Handling	(1) Modellvalidität, Verifikation und Datenvalidität (2) Testauswahl basierend auf Anforderungen (3) Analyse im Zeitbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik
Cassara, Anderson, Olofsson: A multi-level approach for the validation of a tractor-semitrailer ride and handling model ²²⁰ [Kapitel 7.4]	Handling und Fahrkomfort	(1) Subsystem-Korrelation und -Interaktion, Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik

²¹² Vgl. Kutluay, Winner: Validation of vehicle dynamics simulation models - a review, 2014, S. 191 ff.

²¹³ Modifiziert und ergänzt nach: Kutluay, Winner: Validation of vehicle dynamics simulation models - a review, 2014, S. 197.

²¹⁴ Allen, Chrstos, Howe, Klyde, Rosenthal: Validation of a non-linear vehicle dynamics simulation for limit handling, 2002.

²¹⁵ Allen, Lee, Klyde, Howe, Chrstos, Rosenthal: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation, 2001.

²¹⁶ Allen, Rosenthal: Requirements for vehicle dynamics simulation models, 1994.

²¹⁷ Allen, Rosenthal, Klyde, Owens, Szostak: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis, 1992.

²¹⁸ Alasty, Ramezani: Genetic Algorithm Based Parameter Identification of nonlinear Full Vehicle Ride Model, 2002.

²¹⁹ Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994.

²²⁰ Cassara, Anderson, Olofsson: A multi-level approach for the validation of a tractor-semitrailer ride and handling model, 2004.

Autor(en) und Titel der Veröffentlichung, [Kapitelverweis]	Modellanwendung	Überblick Validierungsstudie (1) Untersuchung, (2) Testverfahren, (3) Analyse, (4) Metrik
Garrott, Grygier, Chrstos, Heydinger, Salaani, Howe, Guenther: Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics (NADSdyna) ²²¹ [Kapitel 7.5]	Handling und Fahrkomfort	(1) Modellvalidität, Experimentelle Datenerhebung (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Graphischer Vergleich mit 95%-Konfidenzintervall, keine Validierungsmetrik
Heydinger: Improved simulation and validation of road vehicle handling dynamics ²²² [Kapitel 7.6]	Handling	(1) Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich, tlw. bezogene Größen (4) Statistische Analyse mehrfach durchgeführter Messungen, graphischer Vergleich mit 95%-Konfidenzintervall, keine Validierungsmetrik
Heydinger, Garrot, Chrstos, Guenther: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations ²²³ [Kapitel 7.6]	Handling	(1) Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Statistische Analyse mehrfach durchgeführter Messungen, einfache Validierungsmetrik (Fehler des Effektivwertes und Zeitanteil der Übereinstimmung mit 95%-Konfidenzintervall)
Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator ²²⁴ [Kapitel 7.6]	Handling	(1) Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich, tlw. bezogene Größen (4) Statistische Analyse mehrfach durchgeführter Messungen, graphischer Vergleich mit 95%-Konfidenzintervall, keine Validierungsmetrik
Hu: Experimental Validation of a Half-Vehicle Suspension Model ²²⁵ [Kapitel 7.7]	Fahrkomfort	(1) Parameteranpassungen unter Nutzung experimenteller Daten (2) Transientes Manöver (Schwellenüberfahrt) (3) Analyse im Zeitbereich (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik
Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zöpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models ²²⁶ [Kapitel 7.8]	Triebstrang, dynamische Fahrzeugmodelle	(1) Modellverifikation und Modellvalidität (2) Stationäre und transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich, tlw. bezogene Größen (4) Anwendung statistischer Techniken, objektives Modellqualitätsmaß (Signalkorrelation und Validitätsbereich)
Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models ²²⁷ [Kapitel 7.9]	Handling	(1) Modellvalidität (2) Transiente Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Anwendung statistischer Techniken, subjektives Validitätsmaß
Kutluay, Winner: Assessment Methodology for Validation of Vehicle Dynamics Simulations Using Double Lane Change Maneuver ²²⁸ [Kapitel 7.9]	Handling	(1) Modellvalidität (2) Transientes Manöver (3) Analyse im Zeitbereich (4) Keine statistischen Techniken, keine Validierungsmetrik

²²¹ Garrott, Grygier, Chrstos, Heydinger, Salaani, Howe, Guenther: Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics (NADSdyna), 1997.

²²² Heydinger: Improved simulation and validation of road vehicle handling dynamics, 1990.

²²³ Heydinger, Garrot, Chrstos, Guenther: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990.

²²⁴ Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator, 2007.

²²⁵ Hu: Experimental Validation of a Half-Vehicle Suspension Model, 1993.

²²⁶ Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zöpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011.

²²⁷ Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013.

²²⁸ Kutluay, Winner: Assessment Methodology for Validation of Vehicle Dynamics Simulations Using Double Lane Change Maneuver, 2012.

Autor(en) und Titel der Veröffentlichung, [Kapitelverweis]	Modellanwendung	Überblick Validierungsstudie (1) Untersuchung, (2) Testverfahren, (3) Analyse, (4) Metrik
Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model ²²⁹ [Kapitel 7.10]	Handling	(1) Parameteranpassungen unter Nutzung experimenteller Daten (2) Transiente Manöver (3) Analyse im Zeitbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistische Analyse, keine Validierungsmetrik
Millich, Fife, Guenther: A validation study of vehicle dynamics simulations for heavy truck handling maneuvers ²³⁰ [Kapitel 7.11]	Handling	(1) Modellvalidierung (2) Transiente Manöver (3) Analyse im Zeitbereich (4) Keine statistische Analyse, keine Validierungsmetrik
Ozan, Sendur, Uyanik, Oz, Yilmaz: A Model Validation Methodology for Evaluation Rollover Resistance Performance of a Ford Commercial Vehicle ²³¹ [Kapitel 7.12]	Handling	(1) Parameteranpassungen zur Verbesserung der Korrelation von Simulation und Messung (2) Statische, quasistatische und dynamische Tests; transiente Manöver (3) Analyse im Zeitbereich, tlw. bezogene Größen (4) Keine statistische Analyse, keine Validierungsmetrik
Salaani, Schwarz, Heydinger, Grygier: Parameter Determination and Vehicle Dynamics Modeling for The National Advanced Driving Simulator of the 2006 BMW 330i ²³² [Kapitel 7.6]	Handling	(1) Parameteridentifikationsverfahren zur Erzeugung valider Modelle (2) Stationäre, transiente, frequenzbezogene und realitätsnahe Manöver (3) Analyse im Zeit- und Frequenzbereich (4) Vertrauensintervalle, keine Validierungsmetrik
Sarin, Kokkolaras, Papalambros, Barbat, Yang: A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Model with Emphasis on Vehicle Safety Applications ²³³ [Kapitel 7.13]	Sicherheitsanwendungen, Crash	(1) Objektiver Vergleich zeitbezogener Mess- und Simulationsgrößen (2) Transienter Test (3) Analyse im Zeitbereich (4) Keine statistische Analyse, Validierungsmetrik basierend auf Fehlervergleich

Einen näheren Einblick in die einzelnen Validierungsstudien aus Tabelle 1 liefern die folgenden Unterkapitel, die in Tabelle 1 den einzelnen Veröffentlichungen zugeordnet sind.

7.1 Validierung von Fahrdynamikmodellen nach Allen et al.

Allen ist an zahlreichen Veröffentlichungen über Validitätsuntersuchungen von Fahrdynamikmodellen beteiligt. In der ersten Veröffentlichung aus dem Jahr 1992 wird die Validierung von Fahrdynamik-Simulationsmodellen für zwei unterschiedliche Simulationsprogramme untersucht. Dabei wird zwischen den Bereichen Reifen, Querdynamik und Längsdynamik unterschieden, wobei die Längsdynamikvalidierung auch vertikaldynamische Tests einbezieht. Für die Validierung werden Reifeneigenschaften und fahrdynamische Größen betrachtet, deren Auswahl in der Veröffentlichung jedoch

-
- ²²⁹ Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model, 2010.
- ²³⁰ Millich, Fife, Guenther: A validation study of vehicle dynamics simulations for heavy truck handling maneuvers, 2001.
- ²³¹ Ozan, Sendur, Uyanik, Oz, Yilmaz: A Model Validation Methodology for Evaluation Rollover Resistance Performance of a Ford Commercial Vehicle, 2010.
- ²³² Salaani, Schwarz, Heydinger, Grygier: Parameter Determination and Vehicle Dynamics Modeling for The National Advanced Driving Simulator of the 2006 BMW 330i, 2007.
- ²³³ Sarin, Kokkolaras, Papalambros, Barbat, Yang: A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Model with Emphasis on Vehicle Safety Applications, 2008.
-

nicht begründet wird – z.B. durch eine Anforderungsdefinition für das Modell. Als Validierungstechnik kommt die Augenscheinvalidierung (siehe Kapitel 6.2.2) zum Einsatz. Ein objektives Bewertungsmaß wird nicht herangezogen. Durch einfache Überschlagrechnungen und mittels Plausibilisierung von Zusammenhängen wird das Modell darüber hinaus geprüft. Allen et al. bezeichnen diesen Prozess als *consistency check*. Die wesentlichen betrachteten Reifeneigenschaften sind die Zusammenhänge von Seitenkraft und Lenkwinkel sowie von Seitenkraft und Sturzwinkel und der maximale Reibwert. Untersucht werden außerdem die Änderungen der Schräglaufsteifigkeit, der maximalen Seitenkraft, der Längsschlupfsteifigkeit, der maximalen Längskraft, des Gleitreibbeiwerts, und der Sturzsteifigkeit in Abhängigkeit der Radlast. Für die querdynamische Modellvalidierung werden die Manöver stationäre Kreisfahrt, Sinuslenken mit steigender Frequenz und transientes Lenken im doppelten Spurwechsel herangezogen, wobei querbeschleunigungsbezogene, frequenzbezogene und zeitbezogene Größen zwischen Messung und Simulation verglichen werden. Für die längs- und vertikal-dynamische Validierung werden die Testmanöver Bremsen in der Kurve, Beschleunigen in Geradeausfahrt und das Überfahren zweier Schwellen untersucht. Die Veröffentlichung ist ein gutes Beispiel für die subjektive Gestaltung des Validierungsprozesses, da die Bewertungskriterien, die Auswahl und Durchführung der Versuche und die betrachteten Ausgangsgrößen weder spezifiziert noch objektiv abgeleitet werden.²³⁴

Allen und Rosenthal veröffentlichen zwei Jahre später eine Übersicht von Modellanforderungen, die an unterschiedliche Modelle der Fahrdynamik gestellt werden. Den Anforderungen liegt das Prinzip zugrunde, dass ein Modell nur so komplex sein sollte, wie es der Einsatzzweck erfordert. Sie beschäftigen sich mit den Anforderungen an Modelle für Fahr simulatoren sowie an Modelle für Stabilitäts- und Handlinguntersuchungen. In ihrem Paper werden Modellanforderungen für unterschiedliche Modellklassen zusammengefasst. Die Untersuchungen werden in die fünf Bereiche (1) Fahrdynamikdomänen, (2) Reifen-Fahrbahn-Interaktion, (3) Subsysteme, (4) Modell-Eingänge sowie (5) Fahrzeugkonfigurationen und Modellparameter unterteilt. Zuletzt werden die Aspekte der Modellanwendbarkeit und -validierung thematisiert.²³⁵

In den weiteren Veröffentlichungen gehen Allen et al. auf die Erfordernis ein, Modelle für ihre Anwendungsbereiche zu validieren. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei nichtlineare Effekte dar, die in komplexen Fahrdynamiksimulationen unbedingt abgebildet werden müssen und an diversen Stellen eines Fahrdynamikmodells auftreten. Deshalb werden die vier Validierungsbereiche (1) Reifenverhalten, (2) stationäres Verhalten, (3) transientes Verhalten bei niedrigen Querbeschleunigungen und (4) transientes Verhalten bei hohen Querbeschleunigungen diskutiert. Allen et al. merken an, dass neben der Bewältigung der Komplexität der Reifen auch die Feder- und Dämpferwirkungen bei großen Auslenkungen und Geschwindigkeiten mit hoher Präzision abgebildet werden müssen.²³⁶

²³⁴ Vgl. Allen, Rosenthal, Klyde, Owens, Szostak: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis, 1992, S. 59 ff.

²³⁵ Vgl. Allen, Rosenthal: Requirements for vehicle dynamics simulation models, 1994, S. 1 ff.

²³⁶ Vgl. Allen, Lee, Klyde, Howe, Chrstos, Rosenthal: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation, 2001, S. 1 ff.

Die Erkenntnisse der vorherigen Veröffentlichungen bündeln Allen et al. in einem Paper aus dem Jahr 2002. In diesem beschreiben sie die Validierung eines nichtlinearen Fahrdynamiksimulationsmodells. Als Validierungstests werden Versuche auf einem Reifenprüfstand, die quasistationäre Kreisfahrt mit steigendem Lenkwinkel bei konstanter Geschwindigkeit, der Lenkwinkelsprung, der doppelte Spurwechsel und der Fishhook-Test untersucht. Der Vergleich von Simulationsmodell zum realen Fahrzeug erfolgt mittels Diagrammen, die überwiegend zeitbezogene Größen aufzeigen und subjektiv hinsichtlich der Übereinstimmungsgenauigkeit bewertet werden. Die wesentlichen Vergleichsgrößen sind die Geschwindigkeit, der Lenkradwinkel, die Querschleunigung, der Wankwinkel und die Gierrate. Der doppelte Spurwechsel, der ein Closed-Loop-Manöver darstellt, wird in der Simulation als Open-Loop-Manöver behandelt, indem die Lenkradwinkleingabe aus dem Versuchsfahrzeug in das Modell eingegeben wird. Dies ermöglicht weiterhin, Unterschiede in den fahrdynamischen Größen, wie z.B. Querschleunigung und Gierrate zu identifizieren, was bei einer Closed-Loop-Simulation mit einem virtuellen Fahrer aufgrund der vorgegebenen Trajektorie nicht der Fall wäre. Der Validierungsprozess und die Validitätsbeurteilung erscheint – wie schon in der ersten Veröffentlichung²³⁷ von 1992 – stark subjektiv geprägt zu sein. Eine Metrik und objektive Entscheidungskriterien werden nicht vorgestellt.²³⁸

7.2 Parameterschätzung und Validierung nach Alasty und Ramezani

Alasty und Ramezani schätzen physikalische Parameter eines nichtlinearen Mehrkörpermodells für Fahrkomfortuntersuchungen mittels eines generischen Algorithmus. Sie demonstrieren die Robustheit dieses Verfahrens und führen einen Vergleich mit Versuchsdaten, die auf einem Hydropulsprüfstand erzeugt wurden, durch. Durch Überlagerung zeitbezogener Graphen der vertikalen Aufbaubeschleunigung weisen sie nach, dass die Simulationsergebnisse valide sind.²³⁹

7.3 Systematisierte Validierungsstudie nach Bernard und Clover

Bernard und Clover definieren einen Validierungsprozess, der Vertrauen in die Simulationsergebnisse einzelner Fahrmanöver liefern soll. Hierzu werden folgende drei Fragen adressiert, deren Einflüsse auf die Modellgüte in der Veröffentlichung anhand zahlreicher Diagramme veranschaulicht werden:²⁴⁰

1. Ist das Modell geeignet?²⁴¹

Die Autoren leiten Modellanforderungen für definierte Bewertungseigenschaften ab. Diese betreffen (1) den Eigenlenkgradienten und das Reaktionsverhalten, (2) qualitative und (3)

²³⁷ Allen, Rosenthal, Klyde, Owens, Szostak: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis, 1992.

²³⁸ Vgl. Allen, Chrstos, Howe, Klyde, Rosenthal: Validation of a non-linear vehicle dynamics simulation for limit handling, 2002, S. 319 ff.

²³⁹ Vgl. Alasty, Ramezani: Genetic Algorithm Based Parameter Identification of nonlinear Full Vehicle Ride Model, 2002.

²⁴⁰ Vgl. Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 159 ff.

²⁴¹ Vgl. Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 160 f.

quantitative Aussagen über das Fahrverhalten im nichtlinearen Bereich. Die Fragestellungen, was ein Modell für bestimmte Anwendungen leisten muss und wann reale Tests durchgeführt werden müssen, um Validität zu bewerten bzw. eine Modellauswahl zu treffen, werden behandelt.

2. Sind die Gleichungen, auf denen die Simulation basiert, korrekt?²⁴²

Verifikation muss nach Bernard und Clover von den Softwareentwicklern durchgeführt werden. Nach ihrer Auffassung ist eine konzeptionelle Validierung durch das Überprüfen von Gleichungen bei komplexen Modellen nicht möglich. Die einzige Möglichkeit ist das Ausführen des Modells, um dieses zu testen. Hierzu werden in einer Tabelle²⁴³ sogenannte *error-checking procedures* eingeführt, die jeweils die Untersuchungsmethode und die daraus identifizierbaren Fehler umfassen. So werden beispielsweise in querdynamischen Manövern bis 0,3 g Querbesehleunigung Fehler in den Modellteilen Massen, Geometrie, Schräglauflsteifigkeit, Lenkungsrückstellmoment, Wanklenken, Lenkungselastizität und laterale Radlastverlagerung identifiziert.

3. Sind die Eingangparameter verlässlich?²⁴⁴

Falsche Parameter können aus fehlerhaften Messungen oder falschem Umgang mit den Messdaten entstehen. Zur Überprüfung werden die graphische Verarbeitung (z.B. Kennfelder) und ein Vergleich von Simulationsergebnissen mit Rechen- bzw. Näherungslösungen vorgeschlagen. Der Prozess der Modellparametrierung stellt die größte Herausforderung zur Erzeugung eines validen Modells dar, da er für jede Modell Anwendung erneut durchgeführt werden muss.

Darüber hinaus äußern die Autoren einige Anmerkungen zum Fahrversuch und zur Nutzung der daraus hervorgehenden Messungen als Referenzdatensatz. Hierzu wird im Detail die Veröffentlichung von Heydinger²⁴⁵ diskutiert und anhand von Beispielen gezeigt, dass das Treffen des Streubandes der realen Messungen einerseits bedeutsame Modellfehler verdecken kann und andererseits zu einer großen Fehlertoleranz führt. Das Thema *curve fitting* wird in diesem Zusammenhang ebenfalls aufgegriffen.²⁴⁶

7.4 Validierung des Modells einer Sattelzugmaschine nach Cassara et al.

Cassara et al. validieren das ADAMS-Modell einer Sattelzugmaschine. Hierzu führen sie Tests zur Untersuchung der Subsystem-Korrelation und der Subsystem-Interaktion durch. Diese umfassen die Charakterisierung der Radaufhängung, das modale Testen, die Untersuchung der Trägheitsmomente und weitere spezifische Komponententests, wie Triebstrang und Lenkung. Die vertikaldynamische Modell Anpassung erfolgt anhand von Korrelationen frequenzbezogener Größen. Hierzu werden an

²⁴² Vgl. Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 162 ff.

²⁴³ Entsprechende Tabelle siehe Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 162.

²⁴⁴ Vgl. Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 164.

²⁴⁵ Heydinger, Garrot, Chrstos, Guenther: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990.

²⁴⁶ Vgl. Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics, 1994, S. 164 ff.

zwölf Stellen des Zugfahrzeugs Beschleunigungen gemessen und mit den Simulationsdaten verglichen. Im Anschluss bewerten die Autoren die Prädiktionsfähigkeit und damit die Validität des Modells anhand grundlegender Komfort- und Handling-Eigenschaften, die in Skid-Pad-Versuchen (steigender Lenkwinkel, Lenkwinkelsprung, stationäre Kreisfahrt) und auf dem Highway gemessen wurden. Die Komfortbewertung basiert auf einem Komfortmaß, das die Beschleunigung am Fahrersitz in einen Diskomfortindex übersetzt. Für das Handling werden einzelne Kennwerte objektiv miteinander verglichen und Kurvenverläufe subjektiv bewertet. Die Autoren gehen auf die Herausforderung ein, die gewünschte Korrelation zwischen Messung und Simulation für komplexe Modelle zu erzielen, indem einzelne Parameter des Modells angepasst werden.²⁴⁷

7.5 Validierungsstudie eines Fahrsimulators nach Garrot et al.

Garrot et al. beschreiben die Validierungsmethode für einen Fahrsimulator der zivilen US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit (NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration). Sie erläutern die Techniken der Modellparametrierung. Versuche werden mehrfach durchgeführt, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Darüber hinaus werden Vergleichstechniken für Messungen und Simulationsdaten beschrieben. Garrott et al. erläutern die Modellvalidierung entsprechend Kapitel 3. Sie stellen jedoch heraus, dass Referenzmessungen eines einzelnen realen Systems nicht fehlerfrei sind. Deshalb lässt sich nach ihrer Auffassung das Vertrauen in eine Validitätsaussage steigern, wenn mehrere Fahrzeuge für die Modellvalidierung betrachtet werden. Analytische Untersuchungen und Plausibilitätschecks werden ebenfalls angewendet. Grundlage der Validierung sind (1) die Anwendungsbereiche des Modells, (2) die Ein- und Ausgangsgrößen und (3) die geforderte Übereinstimmungsgenauigkeit im Vergleich von Messung und Simulation. Die Vergleichsmanöver decken die Kategorien (1) stationäre Querdynamik, (2) instationäre Querdynamik, (3) Längsbeschleunigung, (4) Längsverzögerung, (5) fahrbahninduzierte Störungen und (6) andere bzw. anwendungsbezogene Manöver ab. Manöver der letzten Kategorie dienen maßgeblich der Vertrauenssteigerung. Der Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen erfolgt graphisch. Als Bewertungsmaßstab dient ein 95%-Konfidenzintervall. Zuletzt wird ein Überblick über die Validierung für einen 1994er Ford Taurus GL gegeben mit dem Ergebnis, dass das untersuchte Modell – sinngemäß übersetzt – gute Arbeit leistet. Es sei angemerkt, dass zu diesem Projekt eine Vielzahl weiterer Berichte veröffentlicht wurden, auf die Garrott et al. im referenzierten Paper verweisen.²⁴⁸

7.6 Validierungsstudie eines Fahrsimulators nach Heydinger et al.

Heydinger et al. publizieren 2007 zwei mit den Veröffentlichungen von Garrot vergleichbare Paper über die Validierung eines 2006er BMW 330i auf dem *National Advanced Driving Simulator*, der ebenfalls von der NHTSA entwickelt wurde. Berücksichtigung findet dabei die in den nachfolgend

²⁴⁷ Vgl. Cassara, Anderson, Olofsson: A Multi-Level Approach for the Validation of a Tractor-Semitrailer Ride and Handling Model, 2004.

²⁴⁸ Vgl. Garrott, Grygier, Chrstos, Heydinger, Salaani, Howe, Guenther: Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics (NADSdyna), 1997, S. 71 ff.

beschriebenen Veröffentlichungen dargestellte Methodik. Der Fokus des ersten Papers²⁴⁹ liegt auf der Validierung der mechanischen Fahrzeugeigenschaften in stationären, transienten und frequenz-abhängigen Manövern. Hierzu sind die Regelsysteme deaktiviert. Für das sogenannte J-turn-Manöver wird das Fahrzeugmodell zusätzlich mit aktivierter Stabilitätskontrolle validiert. Als objektives Validitätskriterium wird für einige Bewertungsgrößen das subjektiv definierte 95%-Vertrauensintervall, das auf vier Versuchsdurchführungen beruht, herangezogen. In den meisten Fällen erfolgt die Validitätsbeurteilung jedoch anhand von Diagrammen per Augenscheinvalidierung, was sich in Subjektivbeurteilungen wie „steady-state vehicle lateral dynamics simulation predictions are close to the real vehicle physics“²⁵⁰ und „time domain comparisons show relatively close agreement“²⁵¹ äußert. Das zweite Paper²⁵² beschäftigt sich im Wesentlichen mit Methoden zur Parametererfassung für die fahrdynamikrelevanten Modelleigenschaften. Hierzu werden beide Fahrzeugachsen sowie die Reifen umfassend vermessen und Parameterbeziehungen werden mathematisch beschrieben.

Heydinger et al. veröffentlichen 1990 eine Validierungsmethode für Fahrdynamiksimulationsmodelle. In dem Paper stellen die Autoren den damaligen Stand der Wissenschaft im Bereich der Modellvalidierung – insbesondere basierend auf Gesamtfahrzeugexperimenten – detailliert vor und leiten Verbesserungspotenziale ab, auf denen die von ihnen entwickelte Methode aufbaut. Die Bedeutung von Validierung wird in Übereinstimmung mit den Ausführungen in Kapitel 2 spezifiziert, für die Anwendung in unterschiedlichen fahrdynamischen Bereichen wird sensibilisiert, die Erfordernis der Zeit- und Frequenzbetrachtung wird begründet, die Validitätsbeschränkung für spezifische Gruppen von Eingangs- und Ausgangsgrößen wird beschrieben und die Abhängigkeit der Validität von den Erwartungen, wie stark das Modell die Testergebnisse treffen muss, wird erklärt. Das beste Modell zeigt nach Heydinger et al. ein Verhalten, das innerhalb des Streubandes der Messungen realer Tests liegt. Die beiden wichtigsten Bedingungen für die Validierung sind, dass (1) die Modellparameter unabhängig von den Validierungsversuchen identifiziert werden müssen und (2) während des Validierungsprozesses die Modellparameter nicht zur Verbesserung der Übereinstimmung verändert werden dürfen. Dies ist eine auch von anderen Forschern vertretene Auffassung, wie Kapitel 5 offenlegt. Die Validierungsmethode umfasst das experimentelle Testen und die Simulation der gleichen Manöver, die Mittelung der Testdaten, die Reduktion der Simulationsdaten und den darauf basierenden qualitativen und quantitativen Vergleich. Die durchgeführten Manöver sind Lenkwinkelsprung, Geradeausbremsen, Bremsen in der Kurve, doppelter Spurwechsel und Sinuslenken mit steigender Frequenz. Für statistische Aussagen wird jeder Versuch zehnfach durchgeführt. Für den qualitativen Vergleich werden die Mittelwertkurven inklusive ihrer statistischen Vertrauensbereiche und die Si-

²⁴⁹ Vgl. Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator, 2007.

²⁵⁰ Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator, 2007, S. 5.

²⁵¹ Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator, 2007, S. 6.

²⁵² Vgl. Salaani, Schwarz, Heydinger, Grygier: Parameter Determination and Vehicle Dynamics Modeling for The National Advanced Driving Simulator of the 2006 BMW 330i, 2007.

mulationsgraphen übereinandergelegt. Für den Lenkwinkelsprung werden diverse zeitbezogene Metriken ermittelt und qualitativ verglichen. Über stationäre Verstärkungsfaktoren werden die grundlegenden Fahrwerks-, Aufhängungs-, Lenkungs- und Reifenparameter für niedrige Frequenzen adressiert. Zusätzlich werden frequenzbezogene Metriken definiert und ermittelt. Als weitere quantitative Metriken können nach Heydinger et al. die Fehler der quadratischen Mittelwerte oder die prozentualen Zeitanteile, innerhalb derer die Simulationsergebnisse im Vertrauensbereich liegen, bei Manövern, in denen stationäre und transiente Zustände gleichermaßen auftreten können (z.B. doppelter Spurwechsel), betrachtet werden.²⁵³

Nochmals ausführlicher werden die Aspekte in Heydingers Dissertation behandelt. In dieser werden zwei Fahrdynamiksimulationsmodelle dem beschriebenen Validierungsprozess unterzogen. Dabei werden die drei Validierungsbereiche (1) stationäre Zeitdomäne, (2) transiente Zeitdomäne und (3) Frequenzdomäne unterschieden. Er führt sowohl qualitative als auch quantitative Simulationsvalidierungen durch. Bei der qualitativen Validierung wird die Übereinstimmungsgenauigkeit subjektiv und unter Zuhilfenahme von 95%-Konfidenzintervallen bewertet. Bei der quantitative Validierung werden zeit- und frequenzbezogene Kennwerte miteinander verglichen.²⁵⁴

Heydingers Veröffentlichungen sind als besonders bedeutsam anzusehen, da sie nicht nur die theoretischen Aspekte der Modellvalidierung intensiv behandeln, sondern auch die praktische Umsetzung und die Veranschaulichung angestrebt werden.

7.7 Vertikaldynamische Validierung mit Parametertuning nach Hu

Hu beschreibt in einem Paper die Modellbildung, die Parametrierung und die Validierung eines Einspur-Vertikaldynamik-Modells²⁵⁵ für ein Serienfahrzeug mit adaptiven Dämpfern.

Der Modellaufbau und die durch das Modell berücksichtigten Effekte werden beschrieben. Das Modell besitzt sechs Freiheitsgrade und umfasst den Aufbau, die Aufbaufedern, die Dämpfer mit viskoser und coulombscher Reibung, den Reifen sowie weitere viskose und coulombsche Dämpfungsphänomene in der Radaufhängung (z.B. begründet in den Lagerstellen und den Endanschlüssen). Experimente haben gezeigt, dass die Reibung innerhalb der Radaufhängung signifikante Kräfte hervorruft, die für bestimmte Untersuchungen nicht vernachlässigt werden können. Die Modellparametrierung basiert auf unterschiedlichen Quellen, insbesondere Komponenten-Testdaten und Fahrzeug-Spezifikationen. Im Gegensatz zu Heydinger sieht Hu das Feintuning bestimmter Parameter als eine legitime und erforderliche Maßnahme, um eine bessere Übereinstimmung zwischen Modell- und realem Systemverhalten zu erzielen. Hierzu werden Messdaten und Simulationsdaten herangezogen und ausgewählte Parameter derart variiert, dass die bestmögliche Übereinstimmung erreicht wird. Hu wählt unter anderem die Steifigkeiten der Aufbaufedern als Tuningparameter und hebt diese an der Hinterachse von 25,7 N/mm auf 31,3 N/mm an. Dies entspricht einer Variation von 22 %, die im Zuge des

²⁵³ Vgl. Heydinger, Garrot, Chrstos, Guenther: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations, 1990, S. 1 ff.

²⁵⁴ Vgl. Heydinger: Improved simulation and validation of road vehicle handling dynamics, 1990, S. 1 ff.

²⁵⁵ Entsprechende Abbildung siehe: Hu: Experimental Validation of a Half-Vehicle Suspension Model, 1993, S. 2.

Feintunings vorgenommen wird. Hu sieht diese Methode als Möglichkeit, auf umfangreiche Komponentenvermessungen und -tests verzichten zu können. Er erklärt, dass die im Rahmen des Feintunings eingestellten Parameterwerte näher an den realen Werten liegen, die in einer späteren Komponentenvermessung ermittelt wurden, als die Ausgangswerte. Bezüglich der Aufbaubewegung werden augenscheinlich gute Übereinstimmungen erzielt, wobei hier ausschließlich die Hub- und die Nickbeschleunigung im Zeitbereich verglichen werden. Die reifengefederten Massen werden durch das Modell schlecht abgebildet, was der Autor auf unzureichendes Tuning und die nicht genaue Übereinstimmung des Anregungsprofils zwischen Messung und Simulation zurückführt. Für die Modellvalidierung wird die Überfahrt einer einzigen starken Fahrbahnunebenheit mit zwei Geschwindigkeiten und zwei Dämpfereinstellungen herangezogen. Die Auswahl des Manövers wird begründet mit der Anregung niedriger Frequenzen und großer Aufbaubewegungen, das Heranführen der Radaufhängung an ihre Grenzen und die Eignung dieses Manövers für die Subjektivbewertung. Hierbei werden ausschließlich Beschleunigungen im Zeitbereich zwischen Messung und Simulation verglichen mit den gleichen Ergebnissen des Feintuning-Prozesses. Die Validitätsbewertung erfolgt subjektiv per Augenscheinvalidierung. Zuletzt weist Hu den signifikanten Einfluss von Fahrwerksreibung nach.²⁵⁶

Obwohl er mit seiner Arbeit einen systematischen Ansatz für Feintuning im Rahmen einer Modellvalidierung liefern möchte, erscheinen das Vorgehen sowie die Modellbewertung wenig systematisch und stark subjektiv geprägt. Die angewendeten zeitbezogenen Bewertungsmethoden sind nach heutigem wissenschaftlichem Stand für eine Vertikaldynamikanalyse unpassend.

7.8 Validierung eines Brennstoffzellenantriebs nach Klemmer et al.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Veröffentlichung von Klemmer et al. sind die Prozessbeschreibung, die statistische Technik zur Bestimmung eines Korrelationsmaßes und das quantitative Qualitätsmaß, welche in den Kapitel 5.15, 6.3.11 und 6.4.3 beschrieben werden. Diese finden Anwendung auf den Antrieb eines Chevrolet Equinox mit Brennstoffzelle. Die Modellvalidierung wird in die stationäre Validierung (Lastfälle unterschiedlicher konstanter Geschwindigkeiten), die langsam transiente Validierung (Systemaufwärmung bei konstanter Geschwindigkeit), die schnelle transiente Validierung (Beschleunigung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten) und die überlagerte Validierung (drei unterschiedliche Fahrzyklen) unterteilt. Basierend auf den für jede Validierungsstufe definierten objektiven Kriterien folgt ein quantitatives Qualitätsmaß des Modells bestehend aus der Signalkorrelation und dem Validitätsbereich.²⁵⁷

7.9 Querdynamische Modellvalidierung nach Kutluay und Winner

Kutluay wendet den in Kapitel 5.14 beschriebenen Validierungsprozess beispielhaft in drei Fallstudien an. Diese sind der Lenkwinkelsprung, das Sinuslenken mit steigender Lenkfrequenz und der

²⁵⁶ Vgl. Hu: Experimental Validation of a Half-Vehicle Suspension Model, 1993, S. 1 ff.

²⁵⁷ Vgl. Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models, 2011, S. 752 ff.

doppelte Spurwechsel.²⁵⁸ Letzterer wird von Kutluay und Winner auch detailliert in einem gemeinsamen Paper behandelt. Sie beschreiben eine mögliche Herangehensweise für die Validierung eines Simulationsmodells auf Basis dieses standardisierten Manövers. Zunächst werden Möglichkeiten erläutert, wie zeitliche Punkte bestimmt werden können, um die Messdaten aufzuteilen. Die zeitliche Anpassung der Daten wird beschrieben. Hierzu werden drei Methoden für den Umgang mit Mess- und Simulationsdaten vorgestellt. Diese sind die (1) Mittelung der Eingangsgrößen diverser Messungen und Nutzung dieser gemittelten Inputgrößen für die Simulation des Manövers, (2) die Mittelung der Ausgangsgrößen für die Betrachtung des Manövers als ein einzelnes Intervall, wenn die Anzahl von Messungen und Simulationen mit jeweils dem gleichen Inputdatensatz übereinstimmt und (3) das Vorgehen wie in Methode 2, jedoch unter Aufteilung des Manövers in zwei separat auszuwertende Intervalle.²⁵⁹ Kutluays Validitätsmetrik basiert auf der Berechnung der prozentualen Abweichung zwischen den gemittelten Validitätskriterien der Simulation und der Messung. Für einen Fehler kleiner 5% betrachtet Kutluay den Validitätstest als bestanden. Das 95%-Validitätsintervall wird von Kutluay subjektiv bestimmt.²⁶⁰

7.10 Parameteranpassungen in einer Validierungsstudie nach Mcnaull et al.

Ähnlich den Ausführungen von Hu (siehe Kapitel 7.7) wenden Mcnaull et al.²⁶¹ Parameteranpassungen an, um die Übereinstimmung von Simulations- und Messergebnissen zu optimieren und damit nach ihrer Auffassung die Modellvalidität zu verbessern. Dies wird demonstriert anhand des Simulationsmodells eines Lastkraftwagens. Im ersten Schritt werden stationäre Verstärkungsfaktoren simulationsbasiert und experimentell erfasst. Basierend auf den Abweichungen werden Anpassungen an den Fahrwerks- und Lenkungselastizitäten sowie der Wankfedersteifigkeit vorgenommen. Letztere wird für beide Anhängerachsen um den Faktor 10 erhöht, sodass es sich um gravierende Parameteranpassungen am Modell handelt. Für diese quasistatischen Untersuchungen wird bei konstanter Geschwindigkeit der Lenkwinkel langsam erhöht. Die Validitätsbeurteilung erfolgt auf Basis der einzelnen Kennwerte und per Augenscheinvalidierung anhand von Diagrammen. Im folgenden Schritt wird das Zugfahrzeug zusammen mit dem Anhänger untersucht. Auch hier werden seitens der Entwickler weitere Modellanpassungen vorgenommen, wobei auch der im Fokus der Untersuchungen stehende Wankstabilisierungsregler betrachtet wird. Nachdem das Modell für den stationären Fall als valide gilt, kommt es in dynamischen Tests zum Einsatz, in denen eine Abfolge von Lenkwinkelrampen abgefahren wird.²⁶² Die Veröffentlichung von Mcnaull et al. zeigt eine wenig systematische Modellanpassung und weist nach heutigem wissenschaftlichen Stand methodische Defizite auf, da die

²⁵⁸ Vgl. Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013, S. 42 ff.

²⁵⁹ Vgl. Kutluay, Winner: Assessment Methodology for Validation of Vehicle Dynamics Simulations Using Double Lane Change Maneuver, 2012, S. 3180 ff.

²⁶⁰ Vgl. Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models, 2013, S. 42 ff.

²⁶¹ An dieser Veröffentlichung ist auch Heydinger beteiligt.

²⁶² Vgl. Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model, 2010.

Datensätze der Modellparametrierung und der Modellvalidierung nicht unabhängig sind. Insbesondere Aussagen wie z.B. „After some trial and error, it was found that the model performance was improved by changing the sign of this value“²⁶³ und „Again, this solution was achieved by trial and error until the simulated response more closely modeled the experimental data.“²⁶⁴ lassen kein Vertrauen in das Simulationsmodell selbst aufkommen. Die Autoren zeigen lediglich, dass die singuläre Kombination von Modell und unbegründet angepasstem Datensatz für dieses eine spezifische Fahrzeug augenscheinlich Ergebnisse mit guter Übereinstimmung liefert.

7.11 Validierungsstudie für ein Gespannmodell nach Milich et al.

Milich et al. behandeln ebenfalls die Validität eines Gespannmodells. Dieses wird bei steigendem Lenkradwinkel, im J-Turn-Manöver, im doppelten Spurwechsel, beim Geradeausbremsen und beim Bremsen in der Kurve untersucht. Die Bewertung der Simulationsqualität erfolgt per Augenscheinvalidierung in zeitbezogenen Diagrammen. Mit steigender Dynamik nehmen die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment zu. Dass der quantitative Vergleich in dieser Studie nicht im Vordergrund steht, wird durch die Plausibilitätschecks, welche die Autoren durchführen, deutlich.²⁶⁵

Auch wenn die Autoren dem Modell eine gute Genauigkeit für sanftes Handling attestieren, sind in den Diagrammen signifikante quantitative Abweichungen offensichtlich.²⁶⁶ Da kein Validitätsmaß genannt wird, kann hieraus keine konkrete Aussage über die Modellvalidität getroffen werden.

7.12 Korrelationsmethodik zur Validitätsbestimmung nach Ozan et al.

Ozan et al. beschreiben eine Korrelationsmethodik zur Validitätsbestimmung eines Fahrzeugmodells in der Software ADAMS/Chassis, das zu Kippstabilitätsuntersuchungen herangezogen wird. Simulations- und Versuchsdaten, die das statische, das quasistatische und das dynamische Verhalten adressieren, kommen zum Einsatz. Der Validierungsprozess setzt sich aus vier Teilprozessen zusammen. Im ersten Schritt werden Parameterwerte angepasst, um eine bessere Übereinstimmung der massebezogenen Eigenschaften (Masse, Trägheitsmomente, Schwerpunktlage, Achslasten) zu erzielen. Diese Daten werden auf einer *Vehicle Inertia Measurement Facility* (VIMF) erhoben. Zudem müssen die Fahrwerkskennwerte (Federn, Dämpfer, Gummi-Metall-Lager, Stabilisatoren, ...) identifiziert werden. Im zweiten Teilprozess werden die Versuchsdaten auf einem Kinematik- und Elastokinematik-Prüfstand (K&C-Prüfstand) sowie in bestimmten Fahrmanövern (High-G Swept Steer und Fishhook-Test) erfasst. Im dritten Schritt werden die statischen und kinematischen Parameter unter Nutzung der VIMF- und K&C-Messungen validiert. Im letzten Teilprozess erfolgt die dynamische Korrelation, zu der die Fahrversuchsdaten herangezogen werden. Bei erfolgreicher Korrelation ist das Modell

²⁶³ Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model, 2010, S. 3.

²⁶⁴ Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model, 2010, S. 6.

²⁶⁵ Vgl. Milich, Fife, Guenther: A validation study of vehicle dynamics simulations for heavy truck handling maneuvers, 2001.

²⁶⁶ Vgl. Milich, Fife, Guenther: A validation study of vehicle dynamics simulations for heavy truck handling maneuvers, 2001.

nach Ozan et al. für Kippstabilitätsuntersuchungen geeignet. In der Veröffentlichung zeigen die Autoren eine Vielzahl von Vergleichsgraphen und attestieren ihrem Modell ein hohes Korrelationslevel und damit Validität. Ein objektives Maß und ein detaillierter Einblick in die Korrelationsuntersuchung werden nicht aufgezeigt.²⁶⁷

Die Veröffentlichung erweckt den Eindruck, dass bei subjektiv guter Übereinstimmung der Simulations- und Versuchsgraphen von einem hohen Korrelationsmaß gesprochen wird und dieses durch Parameteranpassungen im *Trial and Error*-Verfahren erreicht wurde.

7.13 Statistischer Vergleich in einer Validierungsstudie nach Sarin et al.

Sarin et al. wenden die von ihnen empfohlene statistische Vergleichstechnik (siehe Kapitel 6.3.11) zeitbezogener Mess- und Simulationsgrößen auf Crashdaten an. Aus dem Vergleich dieser Daten werden ein Phasen-, ein Größen- und ein Topologiefehler bestimmt. Anhand einer Fallstudie wird gezeigt, wie eine Aussage über die prädiktiven Fähigkeiten eines Modells basierend auf diesen quantitativen Werten gewonnen werden kann. In einer zweiten Studie demonstrieren die Autoren, wie die Metrik in Verbindung mit auf Expertenwissen basierenden Daten zur regressionsbasierten Modellbildung genutzt werden kann.²⁶⁸

7.14 Einzelfahrmanöver in der Fahrdynamik

Wie die zuvor beschriebenen Validierungsstudien zeigen, spielen Einzelfahrmanöver und detaillierte Manöveranalysen für die Validierung von Fahrdynamikmodellen eine sehr wichtige Rolle. Diese speziellen Fahrmanöver bieten gegenüber der freien Fahrt auf öffentlicher Straße die Vorteile besserer Reproduzierbarkeit und der Fokussierung bzw. Hervorhebung einzelner Fahrzeugeigenschaften, was ein methodisches Vorgehen bei der Optimierung oder bei der Analyse des Fahrverhaltens unterstützt.

Viele Manöver wurden in Form von ISO- und DIN-ISO-Normen standardisiert. In den Normen werden unter anderem die Durchführung, die objektiven Bewertungsgrößen sowie die hierfür erforderlichen Messgrößen definiert. Zudem bestehen wissenschaftliche Veröffentlichungen, die sich ebenfalls mit Einzelfahrmanövern im Hinblick auf deren Potenzial zur Fahrdynamikbeurteilung, deren Durchführung und deren Auswertung auseinandersetzen.²⁶⁹

²⁶⁷ Vgl. Ozan, Sendur, Uyanik, Oz, Yilmaz: A Model Validation Methodology for Evaluation Rollover Resistance Performance of a Ford Commercial Vehicle, 2010.

²⁶⁸ Vgl. Sarin, Kokkolaras, Papalambros, Barbat, Yang: A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Model with Emphasis on Vehicle Safety Applications, 2008, S. 6 ff.

²⁶⁹ Vgl. u.a. Rompe, Heißing: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, 1984, S. 13.

Vgl. u.a. Zomotor, Braess, Rönitz: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 1, 1997.

Vgl. u.a. Zomotor, Braess, Rönitz: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 2, 1998.

Vgl. u.a. Decker: Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen, 2008.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht wichtiger genormter Fahrmanöver. Darüber hinaus bestehen weitere Manöver, die für bestimmte Testverfahren standardisiert wurden, wie z.B. das sogenannte Fishhook-Manöver²⁷⁰ für das NCAP (*New Car Assessment Programme*).

Tabelle 2: Überblick über gebräuchliche, normierte Fahrmanöver

Norm	Fahrmanöver	
DIN ISO 4138 ²⁷¹	Stationäre Kreisfahrt	
DIN ISO 7975 ²⁷²	Bremsen in der Kurve	
DIN ISO 9816 ²⁷³	Lastwechselreaktion eines Fahrzeugs bei Kreisfahrt	
ISO 3888-1 ²⁷⁴	(Schneller) doppelter Spurwechsel	
ISO 3888-2 ²⁷⁵	(Langsamer) doppelter Spurwechsel / Ausweichtest	
ISO 7401 ²⁷⁶	Testverfahren für transientes querdynamisches Übertragungsverhalten	Lenkwinkelsprung
		Einzelsinus-Lenkradwinkeleingabe
		Dauersinus-Lenkradwinkeleingabe
		Dreieckimpuls-Lenkradwinkeleingabe
		regellose Lenkradwinkeleingabe
ISO 12021-1 ²⁷⁷	Seitenwindempfindlichkeit	
ISO 13674-1 ²⁷⁸	Lenken um die Mittellage: <i>Weave</i> -Test	
ISO 13674-2 ²⁷⁹	Lenken um die Mittellage: <i>Transition</i> -Test	
ISO 14512 ²⁸⁰	Geradeausbremsung auf einer Fahrbahn mit geteiltem Reibwertkoeffizienten	
ISO 14793 ²⁸¹	Testverfahren für transientes querdynamisches Übertragungsverhalten von Nutzfahrzeugen und Bussen	Lenkwinkelsprung
		Einzelsinus-Lenkradwinkeleingabe
		Dauersinus-Lenkradwinkeleingabe
		Dreieckimpuls-Lenkradwinkeleingabe
		regellose Lenkradwinkeleingabe

²⁷⁰ Vgl. NCAP: Fishhook Maneuver, 2013.

²⁷¹ Deutsche Norm: DIN ISO 4138: Straßenfahrzeuge - Stationäre Kreisfahrt, 1984.

²⁷² Deutsche Norm: DIN ISO 7975: Straßenfahrzeuge - Bremsen in der Kurve - Testverfahren im offenen Regelkreis, 1987.

²⁷³ Deutsche Norm: DIN ISO 9816: Personenkraftwagen - Lastwechselreaktionen eines Fahrzeugs bei Kreisfahrt - Testverfahren im offenen Regelkreis, 1995.

²⁷⁴ International Standard: ISO 3888-1: Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 1: Double lane-change, 1999.

²⁷⁵ International Standard: ISO 3888-2: Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 2: Obstacle avoidance, 2002.

²⁷⁶ International Standard: ISO 7401: Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods, 2003.

²⁷⁷ International Standard: ISO 12021-1: Road vehicles - Sensitivity to lateral wind - Part 1: Open-loop test method using wind generator input, 1996.

²⁷⁸ International Standard: ISO 13674-1: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test, 2010.

²⁷⁹ International Standard: ISO 13674-2: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 2: Transition test, 2006.

²⁸⁰ International Standard: ISO 14512: Passenger cars - Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction - Open-loop test procedure, 2014.

²⁸¹ International Standard: ISO 14793: Road vehicles - Heavy commercial vehicles and buses - Lateral transient response test methods, 2003.

Norm	Fahrmanöver
ISO 17288-1 ²⁸²	freies Lenkverhalten: freigegebene Lenkung
ISO 17288-2 ²⁸³	freies Lenkverhalten: Lenkimpuls
ISO/FDIS 21994 ²⁸⁴	Bremsweg bei Geradeausbremsung mit ABS
ISO/TS 20119 ²⁸⁵	Lenken um die Mittellage: Bestimmung der Streuung für die Geradeausfahrt

Zomotor et al. haben die geläufigsten Manöver klassifiziert.²⁸⁶ Aus ihrer Taxonomie geht hervor, zur Untersuchung welches fahrdynamischen Zustandes (Kurvenverhalten, Wechselkurvenverhalten, Übergangsverhalten, Geradeausverhalten) ein Manöver geeignet ist und ob es sich um ein Closed-Loop- oder um ein Open-Loop-Manöver handelt. Bei einem Closed-Loop-Manöver ist der Fahrer als Regler in den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt integriert. Diese Art von Manöver wird herangezogen, um die Interaktion von Fahrer und Fahrzeug näher zu untersuchen und um Subjektivbewertungen des Fahrverhaltens vorzunehmen. Open-Loop-Manöver entsprechen im regelungstechnischen Sinne einer Steuerung. Dies bedeutet, dass die Betätigung der Bedienelemente zur Längs- (Gaspedal, Bremspedal, Kupplung, Schaltung) und Querverführung (Lenkrad) zeitlich und unabhängig von der Trajektorie, die das Fahrzeug hierdurch verfolgt, definiert sind. Bei dieser Art von Manöver steht die Objektivbewertung anhand metrischer Kennwerte im Vordergrund, da das Ergebnis unabhängig von den Fähigkeiten des Fahrers ist.²⁸⁷

Neben den standardisierten Fahrmanövern werden spezifische fahrdynamische Eigenschaften in unterschiedlichen Studien sehr detailliert untersucht. So beschäftigen sich beispielsweise Dettki²⁸⁸ mit der objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen und Decker²⁸⁹ mit der Beurteilung der Querdynamik. Basierend hierauf können konkrete Modellanforderungen für den Validierungsprozess abgeleitet werden. Die Erfordernis detaillierter Modell- und Manöveranalysen für die Modellvalidierung gilt gleichermaßen für die Anwendung von standardisierten bzw. genormten Fahrmanövern wie auch für individuelle Manöver, die in einer Validierungsstudie Anwendung finden.

²⁸² International Standard: ISO 17288-1: Passenger cars - Free-steer behaviour - Part 1: Steering-release open-loop test method, 2002.

²⁸³ International Standard: ISO 17288-2: Passenger cars - Free-steer behaviour - Part 2: Steering-pulse open-loop test method, 2004.

²⁸⁴ International Standard: ISO/FDIS 21994: Passenger cars - Stopping distance at straight-line braking with ABS - Open-loop test method, 2007.

²⁸⁵ International Standard: ISO/TS 20119: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Determination of dispersion metrics for straight-line driving, 2002.

²⁸⁶ Entsprechende Abbildung siehe Zomotor, Braess, Rönitz: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 1, 1997, S. 781.

²⁸⁷ Vgl. u.a. Heißing, Ersoy, Gies: Fahrwerkhandbuch, 2013, S. 126 ff.

Vgl. u.a. Rompe, Heißing: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, 1984, S. 13.

²⁸⁸ Dettki: Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen, 2005.

²⁸⁹ Decker: Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen, 2008.

8 Fazit und Konzept einer objektiven Validierungsmethode

Der in den Kapiteln 2 bis 7 zusammengefasste Stand der Technik und der Wissenschaft zeigt, dass der Modellvalidierung eine zunehmende Bedeutung zukommt und dass für diese unterschiedlichste Herangehensweisen und Schwerpunktsetzungen bestehen. Bereits der Umfang dieses Forschungsberichts offenbart, dass eine sehr große Forschungsgrundlage für die Gestaltung von Validierungsprozessen und für die innerhalb der Prozesse anwendbaren Validierungstechniken vorliegt. Allerdings hat sich bis heute keine allgemein anwendbare Validierungsmethode herausgestellt, die die Qualitätsmerkmale *Anforderungsbezug*, *Nachvollziehbarkeit*, *Praktikabilität* und *durchgängige Objektivität* erfüllt. Bisherige praktizierte oder beschriebene Validierungsmethoden lassen an unterschiedlichen Stellen in der Prozesskette subjektive Entscheidungen zu. Die Anforderungsdefinition, die Testauswahl, die angewendeten Validierungstechniken selbst und die Validitätsbeurteilung sind nur die bedeutendsten Beispiele hierfür.

Durch die Analyse des Stands der Technik lässt sich ein Gesamtkonzept einer Validierungsmethode – die auch in anderen Bereichen als der Fahrdynamik Anwendung finden kann – ableiten, welches die oben genannten Qualitätsmerkmale in vollem Umfang erfüllt. Zudem ist diese Validierungsmethode auf die operative Modellvalidierung im strengsten Sinne ausgelegt. Dies bedeutet, dass das Ziel die Validierung des ausführbaren Simulationsmodells selbst – also unabhängig von einer singulären Parametrierung des Modells – ist, was der grundlegenden Ausführung von Sargent entspricht:

“To obtain a high degree of confidence in a simulation model and its results, comparisons of the model’s and system’s output behaviors for several different sets of experimental conditions are usually required.”^{290,291}

Das übergeordnete Ziel ist somit der Nachweis prädiktiver Fähigkeiten des Modells, entsprechend der Beschreibung von prädiktiver Validierung in Kapitel 6.3.6. Die Analyse der in Kapitel 7 vorgestellten Validierungsstudien, in denen ausnahmslos die Validierung für konkrete Modell-Parameterdatensatz-Kombinationen erfolgt, zeigt den Neuheitswert dieses Ansatzes. Insbesondere für Simulationsmodelle, die für zahlreiche Parameterdatensätze angewendet werden, wie es z.B. in der Automobilindustrie aufgrund der Variantenvielfalt der Fall ist, stellt diese Modellvalidierungsmethode einen besonders hohen Nutzen und Effizienzgewinn dar, da die Anzahl notwendiger und kostspieliger Vergleichsmessungen reduziert werden kann. Zudem erhebt das Konzept den Anspruch, sich auf die essentiellen Bestandteile einer objektiven Validierungsmethode zu beschränken, um damit den Fokus auf das systematische Vorgehen, die Praktikabilität und die Objektivität der Modellvalidierung legen zu können. Systematik und Praktikabilität sind die Grundvoraussetzungen dafür, dass die Methode nachvollziehbar ist und Akzeptanz erfährt. Das Ziel ist ein sowohl für wissenschaftliche Studien als auch für industrielle Anwendungen geeigneter Prozess zur Steigerung des Vertrauens in simulationsbasierte Ergebnisse. Das Gesamtkonzept basiert grundlegend auf dem in diesem Bericht zusammen-

²⁹⁰ Sargent: Verification and validation of simulation models, 2009, S. 169.

²⁹¹ Sinngemäße Übersetzung des Zitats:

Um einen hohen Vertrauensgrad in ein Simulationsmodell und dessen Ergebnisse zu erzielen, werden gewöhnlich Vergleiche der Ausgangsgrößen des Modells und des realen System für mehrere verschiedene Versuchsbedingungen gefordert.

getragenen Forschungsstand und kombiniert die Prozessdefinitionen zu einem schlanken, aber systematischen Validierungsprozess, der durch Einsatz objektivierbarer Validierungstechniken zu einer vollumfänglichen Definition einer Validierungsmethode führt. Der Gesamtprozess ist zudem dadurch gekennzeichnet, dass die Teilprozesse eindeutig voneinander abgegrenzt, aber klar miteinander verknüpft werden und die jeweils an den nächsten Teilprozess zu übertragene Ergebnisse fest definiert und objektiv zu erheben sind.

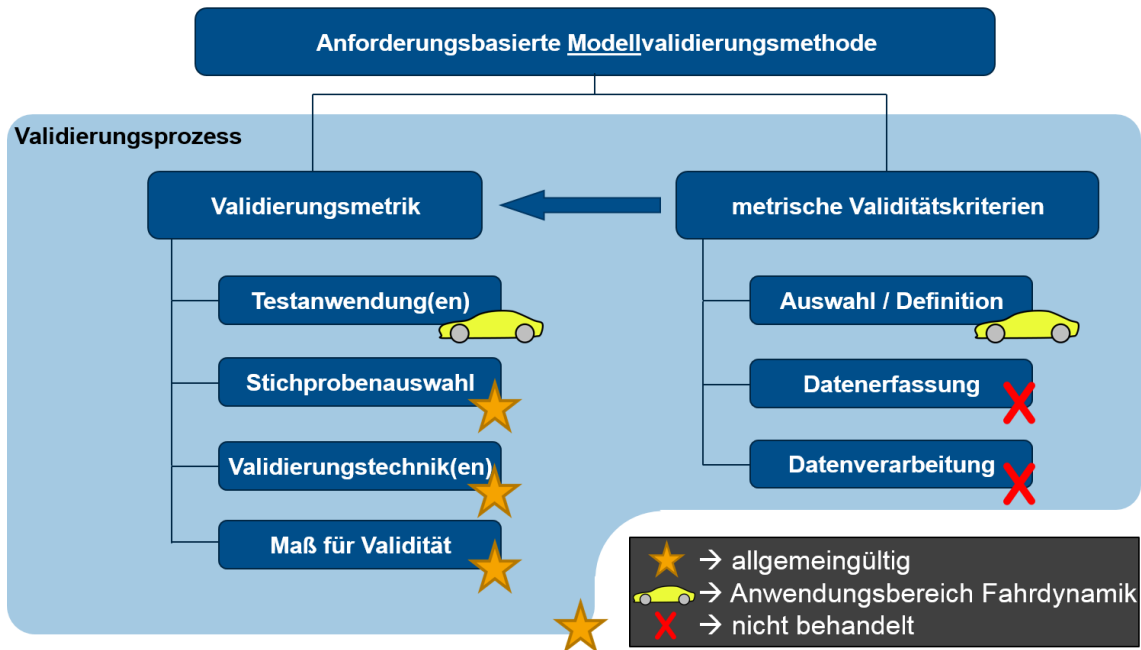


Abbildung 8-1: Übersicht der anforderungsbasierten Modellvalidierungsmethode

Abbildung 8-1 zeigt die notwendigen Bestandteile einer Modellvalidierungsmethode sowie deren Berücksichtigung in diesem Bericht (siehe Legende). Grundlegend werden für die Bewertung der Modellvalidität eine Validierungsmetrik sowie metrische Validitätskriterien benötigt.

Die metrischen Validitätskriterien sind die Antwort auf die Frage: Was wird bewertet? Sie sind die messbaren Größen, die das Modell in seiner Anwendung charakterisieren. Für Fahrdynamikuntersuchungen muss eine Auswahl bzw. eine Definition von Größen erfolgen, die die zu validierenden Fahrzeugeigenschaften – diese sind abhängig von den Modellanforderungen – kennzeichnen. An die metrischen Validitätskriterien wird die Anforderung gestellt, dass sie aussagekräftig und robust sein müssen. Da die operative Validierung (vgl. Kapitel 3) den Vergleich mit experimentellen Daten voraussetzt und somit die metrischen Validitätskriterien sowohl in der Simulation als auch im realen Versuch erhoben werden müssen, sind die Themen Datenerfassung und Datenverarbeitung ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Der vorliegende Bericht gibt in Kapitel 7 eine Übersicht über die in den bestehenden Validierungsstudien in der Fahrdynamik betrachteten Validitätskriterien sowie deren Auswahlprozess.

Die Validierungsmetrik gibt Antwort auf die Fragestellung: Wie wird die Validität bewertet? Für eine Modellvalidierung sind die Testanwendungen, die Stichprobenauswahl, die Validierungstechniken und das Maß für die Validitätsbeurteilung festzulegen. Die metrischen Validitätskriterien finden Anwendung in dieser Metrik. Die Testanwendungen sind die Versuche, z.B. Einzelfahrmanöver oder

Prüfstandsversuche, in denen die Vergleichsdaten aus der Simulation und der Messung erhoben werden. Um die Prädiktionsfähigkeit des Modells nachzuweisen, ist entsprechend der obigen Ausführungen eine Stichprobenauswahl von Parameterdatensätzen bzw. Fahrzeugkonfigurationen zu treffen. Ziel ist es, innerhalb der Stichproben eine Aussage über die Interpolierbarkeit des Modells zu tätigen und ggf. auf Basis dieser Erkenntnisse auch die Extrapolierbarkeit – also die Erweiterung des Anwendungsbereichs ohne Durchführung weiterer Vergleichsversuche mit dem realen System – zu untersuchen. Objektive Validierungstechniken sind nicht nur für den Vergleich von Messdaten und Simulationsergebnissen auszuwählen, sondern können weitere Entscheidungen, wie die Versuchsauswahl, die Art der Versuchsdurchführung, die Stichprobenauswahl und die Versuchsplanoptimierung unterstützen. Insbesondere die Sensitivitätsanalyse und statistische Vergleichsverfahren stellen sich hier als vielfältig einsetzbar heraus. Das vierte Element der Validierungsmetrik ist das Maß für Modellvalidität und stellt eine Art Label, welches Auskunft über das Abschneiden des Modells im Validierungsprozess gibt, dar. Wie Abbildung 8-1 zeigt, fasst dieser Bericht die Erkenntnisse aller Elemente der Validierungsmetrik zusammen, wobei die Testanwendungen mit Fokus auf die Fahrdynamiksimulation behandelt werden.

Die Validierungsmetrik und die metrischen Validitätskriterien sind fest in den Validierungsprozess eingebettet. Dieser liefert in der ersten Stufe die Anforderungen, die es zu validieren gilt. Auch der Prozess der Anforderungsdefinition ist systematisierbar.

Eine Ableitung des heute üblichen Validierungsvorgehens und der zugehörigen sechs-stufigen Prozessstruktur erfolgt von Viehof, Niemann, Kochem und Winner in ihrer Veröffentlichung mit dem Titel *Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation*²⁹². Die Ergebnisse basieren auf einer Analyse des Stands der Technik und der Wissenschaft. Sie leiten ein neues Konzept einer Validierungsmethode ab, das die zuvor genannten Qualitätsmerkmale erfüllt und auf dem heute üblichen Vorgehen aufbaut. Zudem wird eine neue 3-stufige Validierungsstrategie eingeführt. Abbildung 8-2 zeigt die Prozessstruktur.

Der in Abbildung 8-2 abgebildete Modellvalidierungsprozess basiert auf der Methode des Falsifikationismus und greift somit diese wissenschaftsphilosophische Grundlage für die praktische Modellvalidierung auf. Ziel ist es, durch Versuche einen empirischen Nachweis über die Gültigkeit des Modells zu erbringen, wobei induktiv von den speziellen empirischen Nachweisen auf die zulässigen Anwendungsbereiche des Modells geschlossen wird. Hierin besteht der erweiterte Praxisnutzen durch die nachgewiesene Prädiktionsfähigkeit des Modells (vgl. Kapitel 6.3.6). Dieser Nachweis kann jedoch nur durch Parameterdatensatz-Stichproben erzielt werden, was im Vergleich zu der typischerweise durchgeführten Validierung einer singulären Modell-Parameterdatensatz-Kombinationen zu einem einmalig erhöhten Aufwand führen kann, aber im Gegenzug durch die statistisch nachgewiesene Prädiktionsfähigkeit bei einem vielfältigen Einsatz des Modells mit unterschiedlichen Parameterdatensätzen weitere Validierungsstudien unnötig macht und somit wiederum zu einem erheblichen Effizienzgewinn führt.

²⁹² Viehof, Niemann, Kochem, Winner: *Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation*, 2016.

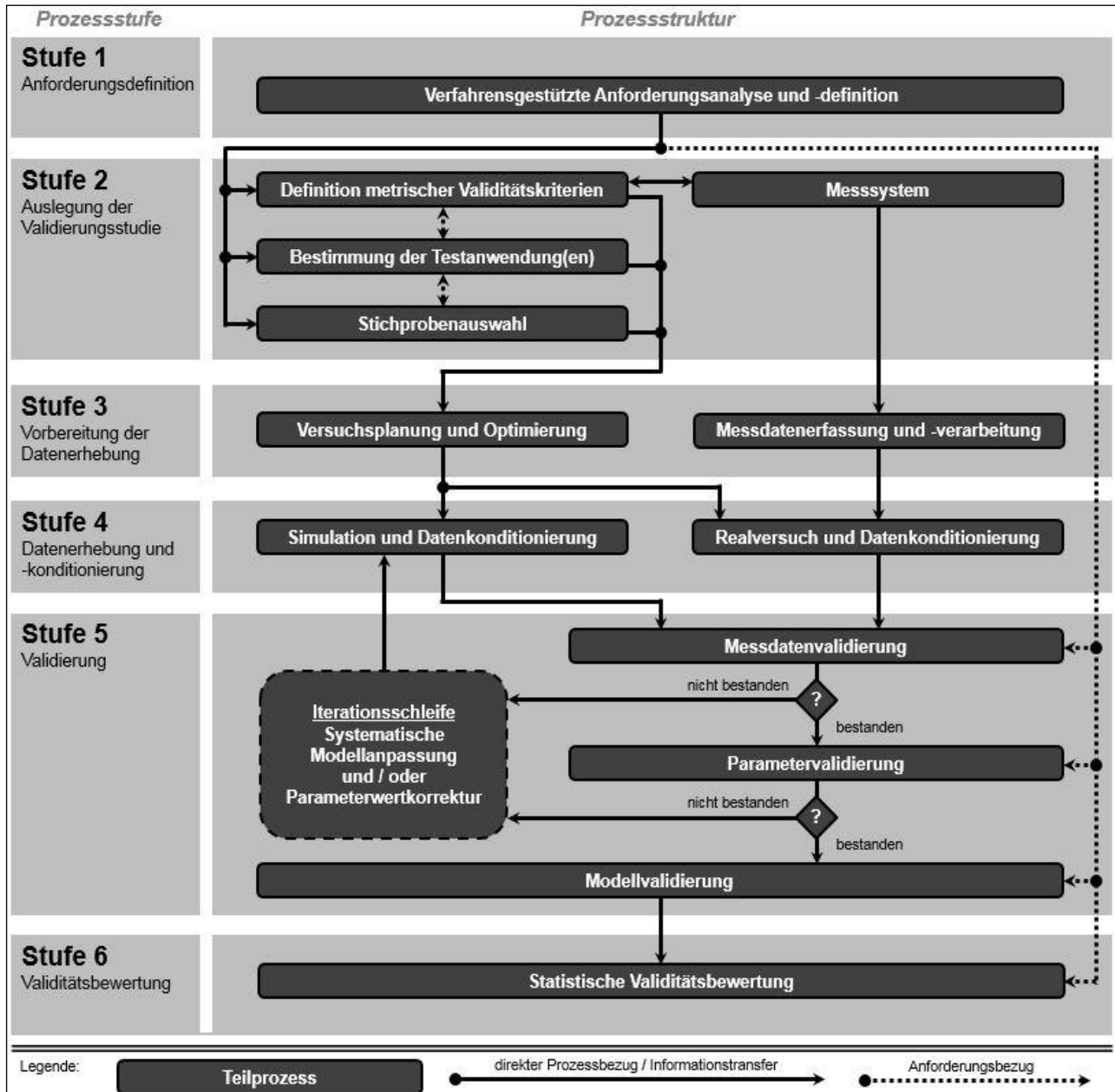


Abbildung 8-2: Prozess einer objektiven Validierungsmethode

Die Systematik des Prozesses bewirkt, dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Fehlers von Typ I, II oder III, welche von Balci beschrieben werden (vgl. Kapitel 5.8), minimiert wird. Zudem spielen die Identifikation von Fehlern und Ungenauigkeiten, wie sie z.B. von Shannon (vgl. Kapitel 5.2) sowie Oberkampff und Trucano (vgl. Kapitel 5.11) erwähnt werden, für den Genauigkeitsgrad des Modells und den zulässigen Anwendungsbereich eine wichtige Rolle. Diesbezüglich werden neben den Modellungenauigkeiten auch die Streuungen der Messungen, die als Repräsentation des realen Systemverhaltens und damit als Maßstab für das Modell herangezogen werden, erfasst. Im Gegensatz zu den Ausführungen einiger anderer Forscher verbietet diese Methode durch ihre Systematik unbegründete Modell- oder Parameteranpassungen und setzt im Gegenzug auf die Identifikation und Lokalisierung etwaiger Modell- oder Parameterungenauigkeiten, die in Folge – sofern die Erfordernis besteht – korrigiert werden können.

Techniken zur Objektivierung und zur Automation von Prozessentscheidungen, Prozessoptimierungen, Simulation-Messung-Vergleichen und Validitätsbewertungen werden den einzelnen Teilprozessen zugeordnet und durch die Möglichkeit der Implementierung in Softwaretools universell anwendbar, was die Methodik insbesondere für industrielle Anwendungen attraktiv macht. Unter Prozessentscheidungen sind z.B. die Auswahl der Testanwendungen und der Stichprobendefinition zu verstehen. Die Prozessoptimierung betrifft insbesondere die Versuchsplangestaltung und die Reduktion der Auswertung auf relevante und signifikante Validitätskriterien. Simulation-Messung-Vergleiche sind die Grundlage für die Validitätsbewertung.

Eine Optimierung des Modellvalidierungsprozesses stellt die dreistufige Validierung dar. Im ersten Schritt erfolgt die Messdatenvalidierung. Diese hat zum Ziel, die Signale der virtuellen Sensoren in der Simulation mit denen der Messtechnik im Realversuch formal und bezüglich ihres Wertebereichs abzugleichen. Hierdurch wird sichergestellt, dass vergleichbare Datensätze vorliegen und dass das Simulationsmodell dem gleichen Lastfall unterliegt wie das reale Fahrzeug, was die Grundvoraussetzung für die weiteren Validierungsstufen ist. Dieser Schritt dient dem auch von Sargent (vgl. Kapitel 5.13) als besonders wichtig herausgestellten Nachweis valider Eingangsdaten des Modells, um die Modellvalidität unabhängig von der Datenvalidität analysieren zu können. Im zweiten Schritt folgt die Parametervalidierung. Diese hat zum Ziel, physikalische Grundzusammenhänge, die auf einer geringen Anzahl von Modellparametern basieren, zu berechnen, auf Plausibilität zu prüfen und mit den entsprechenden Daten aus dem Realversuch zu vergleichen. Zudem wird geprüft, ob sich die Parameteränderungen, die zwischen den einzelnen Versuchsstichproben vorgenommen werden, in gleicher Weise auf die Versuchsausgangsgrößen auswirken, wie im Realversuch. Erst im dritten Schritt erfolgt die Modellvalidierung, in der das Modell bezüglich seiner Hauptanforderungen validiert wird, die in der Regel Qualitätsmerkmale eines Produktes definieren und häufig aus komplexen Zusammenhängen resultieren oder spezifische Anwendungsfälle adressieren.

Literaturverzeichnis

- Alasty, Ramezani: Genetic Algorithm Based Parameter Identification of nonlinear Full Vehicle Ride Model. SAE Technical Paper 2002-01-1583, 2002
- Allen, Chrstos, Howe, Klyde, Rosenthal: Validation of a non-linear vehicle dynamics simulation for limit handling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile engineering 216(4):319-327, 2002
- Allen, Lee, Klyde, Howe, Chrstos, Rosenthal: Vehicle Dynamics Validation for Real-Time Simulation. Proceedings of the 1st Human-Centered Transportation Simulation Conference, The University of Iowa, Iowa-City, 2001
- Allen, Rosenthal: Requirements for vehicle dynamics simulation models. SAE Technical Paper 940175, 1994
- Allen, Rosenthal, Klyde, Owens, Szostak: Validation of Ground Vehicle Computer Simulations Developed for Dynamics Stability Analysis. SAE Technical Paper 920054, 1992
- Babuska, Oden: V&V in Computational Engineering and Science. ICES Report 03-52, The University of Texas at Austin, 2003
- Balci: Credibility Assessment of Simulation Results: The State of the Art. Proceedings of the Conference on Simulation Methodology and Validation, 1987 Eastern Simulation Conference, Orlando, FL, 1986
- Balci: Guidelines for Successful Simulation Studies. Simulation Conference, Proceedings. Winter Volume 1, New Orleans, LA, 1990
- Balci: How to Assess the Acceptability and Credibility of Simulation Results. WSC '89 Proceedings of the 21st conference on Winter simulation, ACM, New York, NY, 1989
- Balci: Principles and Techniques of Simulation Validation, Verification, and Testing. WSC '95 Proceedings of the 27th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society, Washington, DC, 1995
- Balci: Quality assessment, verification, and validation of modeling and simulation applications. WSC '04 Proceedings of the 36th conference on Winter simulation, 2004
- Balci: Requirements for Model Development Environments. Technical Report CS83022-R, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1984
- Balci: Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models. WSC '97 Proceedings of the 29th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society, Washington, DC, 1997
- Balci: Verification, Validation and Testing. In Banks: Handbook of Simulation, John Wiley & Sons, New York, NY, 1998
- Balci: Verification, Validation, and Accreditation. WSC '98 Proceedings of the 30th conference on Winter simulation, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, 1998
- Balci: Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. WSC '03 Proceedings of the 35th conference on Winter simulation, driving innovation, 2003
- Balci, Nance: Formulated problem verification as an explicit requirement of model credibility. SIMULATION August 1985 45(2), 1985

-
- Banks: Handbook of Simulation – Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Wiley, Co-published by Engineering & Management Press, New York, S.I., 1998
- Banks: Principles of Simulation. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice: Modelling, Estimation and Control, Auflage 1, John Wiley & Sons, 1998
- Bernard, Clover: Validation of Computer Simulations of Vehicle Dynamics. SAE Technical Paper 940231, 1994
- Birta, Özmizrak: A Knowledge-Based Approach for the Validation of Simulation Models: The Foundation. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation 6(1), ACM, New York, NY, 1996
- Carson: Model Verification and Validation. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002
- Cassara, Anderson, Olofsson: A Multi-Level Approach for the Validation of a Tractor-Semitrailer Ride and Handling Model. SAE Technical Paper 2004-01-2694, 2004
- Chen, Baghdasaryan, Buranathiti, Cao: Model Validation via Uncertainty Propagation and Data Transformations. AIAA Journal 42(7), 2004
- Davis: Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation (VV&A) for Military Simulations. Rand, Santa Monica, CA, 1992
- Decker: Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen. Dissertation, TU München, München, 2008
- Dettki: Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen. Dissertation, Institut A für Mechanik, Universität Stuttgart, 2005
- Deutsche Norm: DIN ISO 4138: Straßenfahrzeuge - Stationäre Kreisfahrt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1984
- Deutsche Norm: DIN ISO 7975: Straßenfahrzeuge - Bremsen in der Kurve - Testverfahren im offenen Regelkreis. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1987
- Deutsche Norm: DIN ISO 9816: Personenkraftwagen - Lastwechselreaktionen eines Fahrzeugs bei Kreisfahrt - Testverfahren im offenen Regelkreis. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995
- Garrott, Grygier, Chrstos, Heydinger, Salaani, Howe, Guenther: Methodology for Validating the National Advanced Driving Simulator's Vehicle Dynamics (NADSdyna). SAE Technical Paper 970562, 1997
- Gass: Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis. Operations Research 31(4):603-631, 1983
- Gass: Model Accreditation: A Rationale and Process for Determining a Numerical Rating. European Journal of Operational Research 66(2), 1993
- Gass, Joel: Concepts of Model Confidence. Computers and Operations Research 8(4), 1981
- Harmon, Gross, Youngblood: Why Validation?. Proceedings of the 1999 Summer Computer Simulation Conference, San Diego, CA, 1999
- Hartmann, Smeyers-Verbeke, Penninckx, Heyden, Vankeerberghen, Massart: Reappraisal of Hypothesis Testing for Method Validation. Anal. Chem. (Analytical Chemistry) 67(24), 1995
- Heißing, Ersoy, Gies: Fahrwerkhandbuch. ATZ / MTZ-Fachbuch, 4., überarb. u. erg. Aufl. 2013, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013

-
- Heydinger: Improved simulation and validation of road vehicle handling dynamics. Dissertation, The Ohio State University, Ohio, 1990
- Heydinger, Garrot, Chrstos, Guenther: A Methodology for Validating Vehicle Dynamics Simulations. SAE Technical Paper 900128, 1990
- Heydinger, Schwarz, Salaani, Grygier: Model Validation of the 2006 BMW 330i for the National Advanced Driving Simulator. SAE Technical Paper 2007-01-0817, 2007
- Hills, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Bounds, Calibration, and Extrapolation. DOE Scientific and Technical Information, 2005
- Hills, Leslie: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Validation Experiments to Application. No. SAND2003-0706. Sandia National Labs., Albuquerque, NM, Sandia National Labs., Livermore, CA, 2003
- Hills, Leslie, Dowding: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Application to the Abnormal Environment. SAND2004-1029, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2004
- Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Model with Application to CTH. SAND2001-0312, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2001
- Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: A Maximum Likelihood Based Metric. SAND2001-1783, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2002
- Hills, Trucano: Statistical Validation of Engineering and Scientific Models: Background. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Report No. SAND99-1256, 1999
- Hodges, Dewar: Is It You or Your Model Talking? A Framework for Model Validation. Rand, Santa Monica, CA, 1992
- Hu: Experimental Validation of a Half-Vehicle Suspension Model. SAE Technical Paper 931966, 1993
- International Standard: ISO 12021-1: Road vehicles - Sensitivity to lateral wind - Part 1: Open-loop test method using wind generator input. International Organization for Standardization, 1996
- International Standard: ISO 13674-1: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test. International Organization for Standardization, 2010
- International Standard: ISO 13674-2: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 2: Transition test. International Organization for Standardization, 2006
- International Standard: ISO 14512: Passenger cars - Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction - Open-loop test procedure. International Organization for Standardization, 2014
- International Standard: ISO 14793: Road vehicles - Heavy commercial vehicles and buses - Lateral transient response test methods. International Organization for Standardization, 2003
- International Standard: ISO 17288-1: Passenger cars - Free-steer behaviour - Part 1: Steering-release open-loop test method. International Organization for Standardization, 2002
- International Standard: ISO 17288-2: Passenger cars - Free-steer behaviour - Part 2: Steering-pulse open-loop test method. International Organization for Standardization, 2004
- International Standard: ISO 3888-1: Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 1: Double lane-change. International Organization for Standardization, 1999

-
- International Standard: ISO 3888-2: Passenger cars - Test track for a severe lane-change manoeuvre - Part 2: Obstacle avoidance. International Organization for Standardization, 2002
- International Standard: ISO 7401: Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods. International Organization for Standardization, 2003
- International Standard: ISO/FDIS 21994: Passenger cars - Stopping distance at straight-line braking with ABS - Open-loop test method. International Organization for Standardization, 2007
- International Standard: ISO/TS 20119: Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Determination of dispersion metrics for straight-line driving. International Organization for Standardization, 2002
- Kleijnen: Case Study - Statistical validation of simulation models. *European Journal of Operational Research* 87, 1995
- Kleijnen: *Experimental Design for Sensitivity Analysis, Optimization, and Validation of Simulation Models*. Wiley; Co-published by Engineering & Management Press, New York, S.I., 1998
- Kleijnen: Validation of Models: Statistical Techniques and Data Availability. *Simulation Conference Proceedings*, 1999 Winter, Phoenix, AZ, 1999
- Kleijnen: Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research* 82, 1995
- Klein, Herskovitz: *Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation*. *Simulation & Gaming* 36(3), 2005
- Kleindorfer, O'Neill, Ganeshan: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science. *Management Science* 44(8), 1998
- Klemmer, Lauer, Formanski, Fontaine, Kilian, Sinsel, Erbes, Zäpf: Definition and Application of a Standard Verification and Validation Process for Dynamic Vehicle Simulation Models. *SAE Int. J. Mater. Manuf.* 4(1):743-758, 2011
- Kutluay: Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models. *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 765*, ISBN 978-3-18-376512-6, Düsseldorf, 2013
- Kutluay, Winner: Assessment Methodology for Validation of Vehicle Dynamics Simulations Using Double Lane Change Maneuver. *Simulation Conference*, 2012. *Proceedings of the Winter*, 2012
- Kutluay, Winner: Validation of vehicle dynamics simulation models - a review. *Vehicle System Dynamics* 52(2), 2014
- Landry, Banville, Oral: Model legitimisation in operational research. *European Journal of Operational Research* 92(3), 1996
- Landry, Malouin, Oral: Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research* 14(3), 1983
- Landry, Oral: In search of a valid view of model validation for operations research. *European Journal of Operational Research* 66(2), 1993
- Law: Statistical Analysis of Simulation Output Data: the Practical State of the Art. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 2007
- Law, McComas: How to Build Valid and Credible Simulation Models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001

-
- Law, McComas: Secrets of successful simulation studies. WSC '91 Proceedings of the 23rd conference on Winter simulation, IEEE Computer Society Washington, DC, 1991
- Lee, Poolla: On Statistical Model Validation. *J. Dyn. Sys., Meas., Control* (Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control) 118(2), 1996
- Lee, Poolla: Statistical Validation for Uncertainty Models. In: *Feedback Control, Nonlinear Systems, and Complexity; Lecture Notes in Control and Information Sciences, Series Volume 202*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1995
- Logan, Nitta: Comparing 10 Methods for Solution Verification, and Linking to Model Validation. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 3(7), 2006
- Logan, Nitta: Solution Verification Linked to Model Validation, Reliability, and Confidence. SAE Technical Paper 2005-01-1774, 2005
- Logan, Nitta: Validation, Uncertainty, and Quantitative Reliability at Confidence (QRC). 41st Aerospace Sciences Meeting, 2003
- Logan, Nitta: Verification & Validation (V&V) Methodology and Quantitative Reliability at Confidence (QRC): Basis for an Investment Strategy. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-150874, 2002
- Logan, Nitta: Verification & Validation: Process and Levels Leading to Qualitative or Quantitative Validation Statements. SAE Technical Paper 2004-01-1752, 2004
- Logan, Nitta, Chidester: Estimating Parametric, Model Form, and Solution Contributions Using Integral Validation Uncertainty Quantification. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2006
- Logan, Nitta, Chidester: Risk Reduction as the Product of Model Assessed Reliability, Confidence, and Consequence. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, 2005
- Mahadevan, Rebba: Validation of reliability computational models using Bayes networks. *Reliability Engineering & System Safety* 87(2), 2005
- Marino, Hogue, Ray, Kirschner: A Methodology For Performing Global Uncertainty And Sensitivity Analysis In Systems Biology. *Journal of theoretical biology* 254(1), 2008
- Mcnaull, Guenther, Heydinger, Grygier, Salaani: Validation and Enhancement of a Heavy Truck Simulation Model with an Electronic Stability Control Model. SAE Technical Paper 2010-01-0104, 2010
- Miller: Sensitivity Analysis and Validation of Simulation Models. *Journal of theoretical biology* 48(2), 1974
- Millich, Fife, Guenther: A validation study of vehicle dynamics simulations for heavy truck handling maneuvers. SAE Technical Paper 2001-01-0139, 2001
- Miser: A foundational concept of science appropriate for validation in operational research. *European Journal of Operational Research* 66(2), 1993
- Murray-Smith: Methods for the External Validation of Continuous Systems Simulation Models: A Review. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 4(1), 1998
- NCAP: Fishhook Maneuver. Department of Transportation, 2013

-
- Oberkampf, Barone: Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics. *Journal of Computational Physics* 217(1), 2006
- Oberkampf, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: A New Methodology for the Estimation of Total Uncertainty in Computational Simulation. 40th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, 1999
- Oberkampf, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 75(3), 2002
- Oberkampf, DeLand, Rutherford, Diegert, Alvin: Estimation of Total Uncertainty in Modeling and Simulation. Sandia Report SAND2000-0824, Albuquerque, NM, 2000
- Oberkampf, Trucano: Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design* 238(3), 2008
- Oberkampf, Trucano: Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences* 38(3), 2002
- Oberkampf, Trucano, Hirsch: Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics. *Appl. Mech. Rev. (Applied Mechanics Reviews)* 57(5), 2004
- Oral, Kettani: The facets of the modeling and validation process in operations research. *European Journal of Operational Research* 66(2), 1993
- Ozan, Sendur, Uyanik, Oz, Yilmaz: A Model Validation Methodology for Evaluation Rollover Resistance Performance of a Ford Commercial Vehicle. SAE Technical Paper 2010-01-0107, 2010
- Pianosi, Sarrazin, Wagener: A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis. *Environmental Modelling & Software* 70, 2015
- Popper: The Logic of Scientific Discovery. Routledge classics, Routledge, London, New York, 2005
- Rabe, Spieckermann, Wenzel: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- Rebba, Mahadevan, Huang: Validation and error estimation of computational models. *Reliability Engineering & System Safety* 91(10-11), 2006
- Refsgaard, Henriksen: Modelling guidelines - terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources* 27(1), 2004
- Romero: Validated Model? Not So Fast. The Need for Model "Conditioning" as an Essential Addendum to Model Validation. Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 3, 2007
- Rompe, Heißing: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen. Fahrzeugtechnische Schriftenreihe, Verl. TÜV Rheinland, Köln, 1984
- Salaani, Schwarz, Heydinger, Grygier: Parameter determination and vehicle dynamics modeling for the national advanced driving simulation (ADVS), 2007. SAE Technical Paper 2007-01-0818, 2007
- Saltelli: Global Sensitivity Analysis. Wiley, Chichester u.a., 2008
- Saltelli, Tarantola, Campolongo, Ratto: Sensitivity Analysis in Practice: A guide to Assessing Scientific Models. John Wiley & Sons, Chichester, 2004
- Saltelli, Tarantola, Chan: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. *Technometrics* 41(1), 1999

-
- Sargent: A tutorial on verification and validation of simulation models. WSC '84 Proceedings of the 16th conference on Winter simulation, IEEE Press Piscataway, NJ, 1984
- Sargent: An Expository on Verification and Validation of Simulation Models. WSC '85 Proceedings of the 17th conference on Winter simulation, ACM New York, NY, 1985
- Sargent: Some Approaches and Paradigms for Verifying and Validating Simulation Models. Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter, 2001
- Sargent: Some subjective validation methods using graphical displays of data. Simulation Conference, 1996. Proceedings. Winter, 1996
- Sargent: Statistical Analysis of Simulation Output Data. ANSS '76 Proceedings of the 4th symposium on Simulation of computer systems, IEEE Press Piscataway, NJ, 1976
- Sargent: The use of graphical models in model validation. WSC '86 Proceedings of the 18th conference on Winter simulation, ACM New York, NY, 1986
- Sargent: Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003
- Sargent: Verification and validation of simulation models. WSC '05 Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, 2005
- Sargent: Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2009
- Sargent: Verification, validation, and accreditation of simulation models. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000
- Sargent: Verifying and Validating Simulation Models. WSC '14 Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference, IEEE Press Piscataway, NJ, 2014
- Sargent, Glasow, Kleijnen, Law, McGregor, Youngblood: Strategic directions in verification, validation, and accreditation research. Simulation Conference, 2000. Proceedings. Winter, 2000
- Sarin, Kokkolaras, Papalambros, Barbat, Yang: A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Model with Emphasis on Vehicle Safety Applications. ASME 2008 International Design Engineering August 3–6, 2008
- Schlesinger: Terminology for model credibility. SIMULATION 32(3), 1979
- Schramm, Hiller, Bardini: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. 2., vollst. überarb. Aufl. 2013, Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2013
- Schruben: Establishing the Credibility of Simulations. SIMULATION 34(3), 1980
- Schwieger: Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften : Reihe C, Dissertationen, 581, Beck, München, 2005
- Shannon: Tests for the verification and validation of computer simulation models. WSC '81 Proceedings of the 13th conference on Winter simulation, 1981
- Siebertz, van Bebber, Hochkirchen: Statistische Versuchsplanung. VDI-Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 2010
- Trucano, Easterling, Dowding, Paez, Urbina, Romero, Rutherford, Hills: Description of the Sandia Validation Metrics Project. Sandia Report, SAND2001-1339, 2001

Trucano, Swiler, Igusa, Oberkampf, Pilch: Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's What. Reliability Engineering & System Safety, Patent 10-11, Jahrgang 91, 2006

Tsang: A broad view of model validation. International Symposium on the Safety Assessment of Radioactive Repositories, Paris 1989

VDI-Richtlinien: VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2004

VDI-Richtlinien: VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2003

Viehof, Niemann, Kochem, Winner: Objektivierungspotenzial der operativen Validierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. In: VDI-Berichte 2279, 18. Kongress SIMVEC – Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2016, 22.-23. November, Baden-Baden, 2016

Webseite: <http://eng-cs.syr.edu/about-the-college/faculty-and-staff/sargent>, Aufruf: 21.02.2016

Webseite: manta.cs.vt.edu/balci/, Aufruf: 24.02.2016

Whitner, Balci: Guidelines for Selecting and Using Simulation Model Verification Techniques. WSC '89 Proceedings of the 21st conference on Winter simulation, ACM, New York, NY, 1989

Zomotor, Braess, Rönitz: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 1. Automobiltechnische Zeitschrift 12/1997, 1997

Zomotor, Braess, Rönitz: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Teil 2. Automobiltechnische Zeitschrift 03/1998, 1998